# THÈSE DE DOCTEUR INGÉNIEUR

Présentée

À L'UNIVERSITÉ DE PARIS VI

Par

Mr GENÊTE Maurice

pour obtenir

*le grade de Docteur Ingénieur*

Sujet de la thèse :

Contribution à l'étude, à la réalisation et à l'exploitation d'un prototype expérimental de combinateur électronique optimisant adapté à l'ordonnancement et à la fluidification du trafic ferroviaire, basé sur le principe dit "MÉMOIRE ACTIVE".

Soutenue le : 18 JUIN 1971

devant la Commission d'Examen

| | | |
|---|---|---|
| MM. | SIMON | Président |
| | PICARD | Examinateur |
| | DEBRAINE | Examinateur |
| | GREMY | Examinateur |
| Dr. | SAUVAN | Examinateur |
| M. | MEYER | Membre invité |

**Texte**

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41543511_0011

# - PREFACE -

*Je suis heureux d'adresser mes remerciements, tout particulièrement à :*

- *Monsieur le Professeur SIMON, de la Faculté des Sciences de Paris, qui a bien voulu me faire l'honneur de présider le jury.*
- *Monsieur le Docteur SAUVAN, membre du jury, qui a bien voulu accepter que je présente cette thèse sur les "Mémoires Actives" en m'intégrant dans l'équipe de son laboratoire.*
- *Monsieur le Professeur PICARD, Directeur de Recherches au Centre National de la Recherche Scientifique, membre du jury.*
- *Monsieur le Professeur DEBRAINE, Adjoint au Directeur du Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay, membre du jury.*
- *Monsieur le Professeur GREMY, de l'Unité d'Enseignement et de Recherche de la Salpêtrière, Directeur du Centre de Calcul et de Statistiques, membre du jury.*
- *Monsieur de FONTGALLAND, Chef du Service de la Recherche S.N.C.F. et Messieurs LEMAIRE et MEYER, Chefs du Département Cybernétique qui m'ont permis de présenter cette thèse sur le sujet faisant l'objet de mes activités professionnelles dans leur Service.*

*Je voudrais aussi remercier :*

- *Messieurs BOUE, FAURE, DEEMER, LAURENT et LINQUIE, Ingénieurs au Département Cybernétique de la SNECMA, qui m'ont formé d'abord et avec lesquels j'ai collaboré ensuite pour la réalisation du combinateur faisant l'objet de cette thèse.*
- *Tous mes collègues du Service de la Recherche S.N.C.F. et en particulier Messieurs PAJON, WISS, THEYSSIER, BURIEZ, DESTRUHAUT, PAPILLON, CAMPENON et Madame HOUDAER qui par leur coopération étroite m'ont permis d'avancer dans ces travaux et d'améliorer la qualité des résultats que j'ai obtenus.*
- *Et ceux qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à la réalisation matérielle de cette publication.*

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

- TABLE des MATIERES -

*Avant-propos*
*Avertissement*

LIVRE I

CONCEPTION d'une STRUCTURE "MEMOIRE ACTIVE"

*CHAPITRE 1 - CONSIDERATIONS sur l'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE*

*1.1 - Généralités*

*1.2 - Concepts d'intelligence naturelle et d'intelligence artificielle*

1.21 - Les définitions de l'intelligence naturelle
1.22 - Les définitions de l'intelligence artificielle

*1.3 - Aperçu historique*

1.31 - La naissance et l'évolution de l'intelligence artificielle. Principaux artisans
1.32 - Le cheminement du raisonnement analogique
1.33 - Conclusions

*1.4 - Les machines en réseau*

Introduction

1.41 - Le neurone

1.411 - Généralités
1.412 - Aspect qualitatif du neurone
1.413 - Aspect fonctionnel du neurone
1.414 - Les articulations interneuronales

1.42 - Aperçu sur la physiologie neuronale

1.421 - Electrogenèse nerveuse
1.422 - L'onde monophasique
1.423 - L'onde diphasique
1.424 - Remarques

1.43 - Les modèles de simulation du neurone et des réseaux nerveux

1.431 - Modèle de neurone plastique avec circuit réverbérant électro-chimique
1.432 - Modèle de simulation électronique du neurone et de certaines propriétés des réseaux nerveux
1.433 - Les Etudes de J.C. LEVY et de l'équipe du CERA

1.44 - Performances neuro-physiologiques susceptibles d'orienter la conception des structures de machine

1.441 - Architecture générale
1.442 - Caractéristiques fondamentales des processus neuro-physiologiques
1.443 - Enoncé d'un "quintuplet d'hypothèses de base" et d'un "quadruplet" d'hypothèses complémentaires

1.45 - Exemples de machines de simulation de comportement

1.451 - Simulation du comportement instinctif

1.4511 - Les tortues de Grey Walter
1.4512 - L'homéostat de Rose Ashby

1.452 - Instruments du comportement intelligent

1.4521 - Le perceptron de Rosenblatt
1.4522 - Les matrices de Steinbuch

1.453 - Les simulations du comportement intelligent

1.4531 - Le "Mémoire Active" du Dr. SAUVAN
1.4532 - Les programmes de simulation
1.4533 - L'appreil Levy

1.46 - Conclusions

CHAPITRE 2 - Les STRUCTURES "MEMOIRES ACTIVES" du Dr. SAUVAN

2.1 - Généralités

2.2 - Notion de "Mémoire Active" - Aperçu historique

2.3 - Principes fondamentaux d'une structure "Mémoire Active"

2.31 - Préambule
2.32 - Terminologie
2.33 - Aspect théorique d'une structure idéale
2.34 - Architecture logique d'une "Mémoire Active"

2.341 - Le Centre d'Inscription
2.342 - Les Centres d'Association
2.343 - Mécanisme C.E.S. - C.A.A. - C.I.
2.344 - Diagramme général
2.345 - Remarques

2.4 - Modes de fonctionnement

2.41 - Inscription positive
2.42 - Inscription négative
2.43 - Génération de cycles
2.44 - Reconnaissance des formes

2.5 - Types structuraux

2.51 - La mémoire graphe
2.52 - La "Mémoire Active" proprement dite"

2.6 - Conclusions

CHAPITRE 3 - Les DOMAINES d'APPLICATION POSSIBLES des STRUCTURES "MEMOIRES ACTIVES"

3.1 - Généralités

3.2 - Ordonnancement d'atelier

3.3 - Reconnaissance des formes

3.31 - Généralités
3.32 - Aperçu historique - Principe
3.33 - Conclusions

3.4 - Régulation de trafic

3.41 - Généralités
3.42 - Application au trafic aérien
3.43 - Application au trafic routier
3.44 - Application au trafic maritime et fluvial

3.5 - *Applications diverses*

3.51 - Gestion des télécommunications téléphoniques
3.52 - Augmentation des vitesses d'intervention de certains services publics
3.53 - Optimisation du problème de l'évacuation
3.54 - Composition des parfums
3.55 - Aide à la création artistique
3.56 - Aide à la prise des décisions
3.57 - Applications diverses

3.6 - *Premières réalisations*

3.7 - *Les problèmes spécifiques de fluidification du trafic ferroviaire*

3.71 - Problèmes généraux
3.72 - Quelques problèmes urgents d'organisation des réseaux
3.73 - Terminologie
3.74 - Procédure de résolution des problèmes combinatoires par une structure "Mémoire Active"
3.75 - Problème de voie unique avec évitements
3.76 - Problème de gare terminale
3.77 - Problème de configuration "Triangle"

3.8 - *Conclusion*

o o

o

## LIVRE II

## APPLICATION des PRINCIPES "MEMOIRE ACTIVE" à un COMBINATEUR ELECTRONIQUE EXPERIMENTAL pour la S.N.C.F.

CHAPITRE 4 - *Le COMBINATEUR ELECTRONIQUE EXPERIMENTAL de la S.N.C.F., BASE sur le PRINCIPE "MEMOIRE ACTIVE"*

4.1 - *Généralités*

4.2 - *Situation du combinateur expérimental S.N.C.F. dans l'organigramme des structures "Mémoires Actives"*

4.3 - *Caractéristiques de base retenues pour la conception*

4.31 - Définition d'un problème réel et du temps de traitement

4.32 - Définition du "problème enveloppe" : le triangle de Gagny

4.321 - Considération géographique
4.322 - Considération de trafic
4.323 - Enoncé du problème

4.33 - Définition générale de la structure

4.331 - Choix du paramètre à minimiser
4.332 - Choix du mode de fonctionnement

4.34 - Définition des paramètres de base

4.341 - Choix du nombre de variables
4.342 - Choix des vecteurs d'action
4.343 - Choix du module de segmentation des itinéraires
4.344 - Définition du poids maximum d'un canton
4.345 - Définition du nombre de "catégories de vitesse" par itinéraire
4.346 - Evaluation de la "puissance combinatoire"

4.35 - Définition des centres
4.36 - Définition des entrées-sorties
4.37 - Définition du dialogue homme-machine
4.38 - Définition de la technologie

4.4 - *Cahier des charges*

4.5 - *Etude fonctionnelle*

4.51 - Généralités
4.52 - Position du problème
4.53 - Elaboration d'un problème à deux dimensions

4.531 - Conception d'un réseau en logique câblée
4.532 - Fonctionnement
4.533 - Introduction des contraintes
4.534 - Observations
4.535 - Représentation de la progression du front d'onde sur un quadrillage
4.536 - Analogie entre un réseau maillé et le réseau ferroviaire
4.537 - Remarques
4.538 - Les différents types d'exploitation
4.539 - Etude du mécanisme d'exploration suivant la méthode inverse. Principe d'optimalité.

4.54 - Elaboration d'un problème à n dimensions

4.541 - Considérations générales

4.542 - Etude fonctionnelle du Centre d'Association de Situation (C.A.S.)

- fonction du C.A.S.
- notion de hiérarchie interactions
- notion de hiérarchie intervariables
- notion de priorité
- notion de fonctionnement en statique et de fonctionnement en dynamique

4.543 - Etude fonctionnelle du Centre de Validation d'Actions (C.V.A.)

4.544 - Etude fonctionnelle du Centre de Vérification de cohérence (C.V.C.)

4.545 - Fonctionnement du C.V.C. - Dialogue C.V.C. - C.V.A.

*4.6 - Analogie entre l'architecture logique et la neurophysiologie*

*4.7 - Réalisation physique des centres*

4.71 - Le Centre d'Association de Situations (C.A.S.)

4.711 - Etude théorique
4.712 - Réalisation physique
4.713 - La logique d'exploitation

4.72 - Le Centre de Validation d'Actions (C.V.A.)

4.721 - Etude théorique du C.V.A.
4.722 - Réalisation physique

4.73 - Le Centre de Vérification de cohérence (C.V.C.)

4.731 - Etude théorique
4.732 - Réalisation physique

4.74 - Le Centre de mémorisation (modules trains)

4.741 - Etude théorique
4.742 - Réalisation physique

4.75 - Le Centre de coordination

4.751 - Centre de sélection
4.752 - Centre timing

4.76 - Le Centre de liaison (interfaces)

4.761 - Interface C.A.S. - Pondération - Modules trains
4.762 - Interface C.A.S. - Matrice de contraintes

*4.8 - Réalisation physique des entrées*

4.81 - Les matrices d'affichage

4.811 - Matrice des contraintes
4.812 - Matrice de pondération
4.813 - Matrice d'affectation
4.814 - Matrice : position sur le canton initial, position sur le canton final
4.815 - Matrice de position initiale sur le canton
4.816 - Matrice : affichage de la hiérarchie intervariables

4.82 - L'ensemble logique de traitement des entrées

4.83 - Le pupitre d'exploitation

4.831 - Le tableau de commande
4.832 - Les affichages divers (hiérarchies, priorités, type d'impression)

*4.9 - Réalisation physique des sorties*

4.91 - La machine à écrire électrique
4.92 - La matrice "configuration des voies"
4.93 - Les logiques de sortie

*4.10 - Organigrammes partiels et généraux*

*4.11 - Aperçu sur la réalisation technologique*

4.111 - Présentation générale
4.112 - Aperçu descriptif
4.113 - Volume de l'électronique
4.114 - Taux de fiabilité de combinateur

CHAPITRE 5 - *EVALUATION des PERFORMANCES*

*Introduction*

*5.1 - Exercice pédagogique à trois dimensions dit "Problème de cube"*

*5.2 - Exercices simplifiés*

5.21 - Bifurcation simple de voies de chemin de fer
5.22 - Voie unique avec évitements de "nez à nez"

5.3 - *Problème d'ordonnancement de trains au départ sur convergence*

5.31 - Méthodologie
5.32 - Objet de l'exercice-discussion de la nature heuristique des solutions
5.33 - Comparaison des résultats "Mémoire Active" à ceux donnés par un ordinateur UNIVAC 1108

- notations
- aspect théorique
- analyse mathématique
- définition du pouvoir optimisant

5.34 - Formulation du problème
5.35 - Résultats
5.36 - Conclusions

5.4 - *Amélioration des performances par le "prétaitement de la hierarchie intervariables"*

5.5 - *Vérification du temps de calcul théorique*

CHAPITRE 6 - *PROBLEMES d'ORDONNANCEMENT REELS TRAITES sur la "MEMOIRE ACTIVE" de la S.N.C.F.*

6.1 - *Le problème ferroviaire de Gagny*

6.11 - Configuration géographique - Segmentation des itinéraires
6.12 - Graphe coloré de l'état des signaux
6.13 - Données du trafic
6.14 - Calcul du temps élémentaire de base
6.15 - Construction de la feuille de dialogue
6.16 - Etablissement du tableau synoptique d'affectation des variables
6.17 - Résultats
6.18 - Vérification par simulation GPSS
6.19 - Conclusions

CHAPITRE 7 - *PROJETS d'AVENIR*

*Avertissement*

7.1 - *Simulation de l'organigramme fonctionnel sur ordinateur*

7.11 - Intérêt d'un moyen souple d'investigation
7.12 - Mise en oeuvre de la simulation
7.13 - Résultats - Enseignements

7.2 - Couplage avec ordinateur

7.21 - Objet
7.22 - Etude fonctionnelle du dialogue M.A-ordinateur
7.23 - Idées générales sur un projet de fluidification réévaluable périodiquement (F.R.P.)
7.24 - Elaboration du dialogue ordinateur-combinateur (couplage type jonction)
7.25 - Dialogue ordinateur-combinateur (couplage type hybride)
7.26 - Remarques

7.3 - L'intégration dans un système cybernétique ferroviaire opérationnel

7.31 - La pensée cybernétique
7.32 - Mise en oeuvre de l'acte cybernétique
7.33 - Application globale au chemin de fer
7.34 - Intégration dans un système d'automatisation de la circulation
7.35 - Conclusions

CHAPITRE 8 - CONCLUSION GENERALE

8.1 - Le combinateur électronique S.N.C.F. : un tremplin pour le futur

8.2 - Les structures "Mémoires Actives" : combineteurs optimisants de l'avenir

INDEX des SIGLES

# AVERTISSEMENT

Cette thèse est divisée en deux parties, que j'appelle Livre I et Livre II.

Dans le Livre I, intitulé "Conception d'une structure Mémoire Active", j'ai voulu faire une présentation générale, formuler une théorie et montrer le champ d'application possible des structures "Mémoires Actives" du Docteur Sauvan. Afin d'essayer de clarifier le sujet et aussi de le replacer dans le domaine plus vaste de l'intelligence artificielle, j'ai recherché les auteurs de théories ou de réalisations susceptibles d'être comparées, ou d'avoir un point commun avec les travaux du Docteur Sauvan. C'est l'objet du chapitre I.

Dans le chapitre II, j'ai tenté d'élaborer une théorie réalisant la synthèse de certaines idées intéressantes émises jusqu'à ce jour sur le sujet et dans le chapitre III, j'ai voulu rassembler les domaines où les mémoires actives sont susceptibles de s'implanter un jour.

Le livre II intitulé "Application des principes - mémoires actives - à un combinateur électronique expérimental pour la SNCF dit "Simulateur de mouvements de trains", traite de la machine de laboratoire réalisée suivant les principes généraux énoncés dans le livre I, avec cependant de nombreuses particularités et adaptations. Cette machine qui a été livrée rn octobre 1970 constitue la base des travaux qui me conduisent à présenter cette thèse.

Le chapitre IV est consacré aux principes de fonctionnement et à la réalisation du prototype SNCF.

Dans le chapitre V, j'ai rapporté l'étude expérimentale telle que je l'ai réalisée, afin de juger des caractéristiques et de la validité des résultats fournis par ce type nouveau de combinateur. Ce chapitre doit son importance au fait qu'il permet de faire le point sur la rapidité de calcul et sur les possibilités combinatoires de la mémoire active, comparativement à un ordinateur.

Le chapitre VI est consacré aux problèmes réels d'ordonnancement que j'ai traités sur la machine.

Enfin dans le chapitre VII, j'ai voulu montrer les études qui restent à faire sur le sujet, notamment en vue de définir à la lumière des résultats obtenus, une machine opérationnelle travaillant en temps réel, adaptée à la fluidification du trafic ferroviaire et intégrée dans un système cybernétique.

## AVANT - PROPOS

Avant d'entrer dans le vif du sujet, je voudrais préciser très succinctement ici le contexte dans lequel la Société Nationale d'Etudes et de Constructions de Moteurs d'Avions (SNECMA) a été amenée à construire une machine de laboratoire appelée "simulateur de mouvements de trains" pour le département cybernétique du Service de la Recherche de la SNCF.

Cette réalisation résulte, je crois, à une date donnée (1968) et dans une zone géographique donnée (région parisienne), de la concordance entre un potentiel scientifique de demande pour la SNCF et un potentiel scientifique d'offre pour la SNECMA.

## *Les besoins de la SNCF*

L'urbanisation de plus en plus poussée de la banlieue parisienne conduit la SNCF à augmenter chaque année le nombre de ses trains sur les lignes de banlieue. Or sur quelques tronçons déjà, un phénomène de "saturation" des circulations apparait aux heures de pointe.

Pour combattre ce phénomène, deux solutions viennent à l'esprit ;

- multiplier le nombre des voies par des travaux de génie civil considérables.
- augmenter la densité des circulations sur les voies existantes par une automatisation poussée.

Devant le coût des expropriations et du génie civil qu'entrainerait la construction de lignes nouvelles au départ des grandes gares parisiennes, les premiers calculs économiques montrent qu'à moyen terme, il est avantageux d'automatiser au maximum en utilisant seulement les infrastructures existantes.

On estime en effet qu'une automatisation poussée permet d'augmenter d'environ 30 % le débit d'une ligne. Dans le cas d'une ligne existante à 4 voies (2 pour chaque sens), augmenter le débit de 30 % reviendrait à construire au minimum une voie parallèle supplémentaire, voire deux. On mesure d'emblée l'intérêt de mettre en plase des systèmes cybernétiques évolués qui permettraient d'éviter dans une première étape la réalisation de tels travaux.

Il est bien évident que cette mesure est un moyen terme. Si le trafic continue à croître sur certains tronçons à la cadence de 3 à 5 % par an, avant 10 ans les 30 % permis par l'automatisation seront absorbés et il faudra bien passer par la solution drastique du génie civil. Notre propos n'étant pas de discuter d'une politique à long terme dans ce domaine, le choix de la solution "automatisation" étant fait, fallait-il encore être techniquement capable de la réaliser.

Or automatiser un réseau ferré, cela veut dire être en mesure de piloter ce réseau en "régime normal", lorsque tous les trains respectent le graphique espace - temps qui leur est assigné mais aussi et surtout en "régime perturbé", lorsqu'un incident survient. Les trains sont alors "desheurés" et il faut malgré tout écouler au mieux le trafic, compte-tenu de la donnée supplémentaire nouvelle : l'incident (retard, déraillement, rupture de rail, dérangement des installations de signalisation etc ....).

On devine donc les besoins de la SNCF en systèmes cybernétiques capables de faire des choix tactiques, de travailler en temps réel et de donner si possible la meilleure des stratégies envisageables. Dans la pratique, il s'agit d'ordonnancer les circulations de trains afin de rendre l'écoulement le plus fluide possible et ceci dans un temps minimum.

## *Les possibilités du département cybernétique de la SNECMA*

Elles étaient essentiellement dues aux recherches neurophysiologiques du Docteur Sauvan (chef de département), qui avait déjà construit depuis 1963 des machines expérimentales appelées par son auteur "Mémoires Actives". Celles-ci, en s'efforçant de simuler l'intelligence humaine, semblaient capables d'apporter une méthode nouvelle pour la résolution des problèmes combinatoires en général et d'ordonnancement en particulier.

Après divers essais sur maquette de régulation de trafic routier aux carrefours, d'ordonnancement d'atelier, de régulation de trafic aérien, etc ..., en 1967 le Docteur Sauvan était en mesure d'étendre son principe "mémoire active" à divers problèmes réels tels que : la reconnaissance des formes (appliquée soit à l'identification d'empreintes digitales, soit à la lecture de caractères) et l'ordonnancement d'un trafic ferroviaire, ordonnancement qui paraissait particulièrement bien se traiter sur une structure "Mémoire Active".

L'existence de ces deux faits concomitants (besoins de possibilités) a conduit la SNCF à passer commande à la SECMA d'une machine de laboratoire adaptée aux problèmes de circulation de trains et destinée à montrer les possibilités ferroviaires d'applications opérationnelles des machines élaborées par le Docteur Sauvan.

C'est dans le cadre de ce contrat et en tant qu'Ingénieur du Service de la Recherche de la SNCF, que j'ai travaillé d'abord avec le Docteur Sauvan et son équipe au département cybernétique de la SNECMA et que maintenant je poursuis les études au Laboratoire de Cybernétique de la SNCF, sur le prototype réalisé.

# L I V R E  I

## CONCEPTION d'une STRUCTURE "MEMOIRE ACTIVE"

# CHAPITRE 1

## Considérations sur l'Intelligence Artificielle

## 1,1 - GENERALITES

Etant donné la particularité du sujet : "Les Mémoires Actives", et la rareté des publications présentées jusqu'à ce jour, j'ai cru intéressant de mener une recherche bibliographique dans le domaine de l'intelligence artificielle afin de mieux situer les travaux du Docteur SAUVAN.

Dans cette approche, mon objectif était multiple :

I) Voir dans quelle mesure le sujet relevait ou ne relevait pas du domaine qu'il est convenu d'appeler "l'intelligence artificielle". Ceci exigeait tout d'abord la définition du terme, par rapport à l'intelligence humaine qui reste encore très mal connue.

2) Essayer d'établir le cheminement des idées qui ont permis d'atteindre le stade actuel de la conception des "Mémoires Actives". Cette démarche explique ma tentative, bien imparfaite et critiquable sans doute d'établir le pont entre les systèmes neurophysiologiques et la structure de telles machines, par l'énoncé de ce que j'appellerai "Le quintuplet d'hypothèses de base".

3) Rechercher les travaux similaires qui ont été faits ou qui sont en cours quelque part dans le monde, afin d'en réaliser, dans la mesure où ils existent, une synthèse permettant de perfectionner les structures actuelles ou de donner naissance à des nouvelles.

4) Envisager les travaux parallèles ou différents qui pourraient se rattacher directement ou indirectement aux préoccupations du Docteur SAUVAN, en vue de regrouper dans la mesure du possible, ce qu'il y aurait de meilleur de part et d'autre.

Je m'empresse de signaler que je n'ai pas atteint les quatre buts énoncés ci-dessus, et que ce domaine d'étude et de recherche reste ouvert.

## 1.2 - CONCEPTS de l'INTELLIGENCE NATURELLE et de l'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

### 1.21 - Les définitions de l'intelligence naturelle

Le domaine de l'intelligence "naturelle" est celui de la psychologie, de la psychophysiologie, de la psychopathologie, etc. Il recouvre des régions immenses telles que l'imagination, la mémoire, la raison qui sont de nos jours encore assez mal définies et délimitées. Aussi l'intelligence, telle qu'elle se manifeste chez les animaux supérieurs et notamment chez l'homme, ne se laisse pas aisément cerner.

C'est pourquoi, avant d'en dégager les caractéristiques qui me semblent fondamentales, j'ai d'abord envisagé son acception commune puis j'ai rassemblé les interprétations personnelles de 5 auteurs appartenant à des disciplines intellectuelles différentes (psychologie, philosophie, médecine, mathématiques).

#### 1.211 - Les définitions classiques

Les dictionnaires indiquent que le mot "intelligence" est dérivé du latin "intelligere" qui signifie "choisir entre", comprendre.

L'intelligence naturelle serait pour tout être vivant la faculté de connaître, mais aussi la capacité de s'adapter à des situations nouvelles. Sous cet angle, l'intelligence caractériserait l'adresse, l'habileté.

Il est aussi énoncé que la philosophie entend par intelligence l'ensemble des fonctions de l'esprit ayant pour objet la perception, la conception et le jugement. Elle revêt donc les facultés qui appartiennent au domaine de la connaissance.

#### 1.212 - Le concept d'intelligence selon Piaget

Selon ce psychologue Suisse, pionnier dans la science de la psychologie de l'enfant ; l'intelligence serait une acquisition à un double titre : celui de l'espèce et celui de l'individu. Pour éclairer ces points de vue, il lui paraît intéressant de faire appel au généticien qui s'efforce de donner une définition mettant en relief les premiers balbutiements de ce que l'on appelle l'intelligence. Sous la plume de cet auteur (1), on trouve la définition suivante :

(1) M. PIAGET : "La naissance de l'intelligence chez l'enfant" - Delachaux et Niestlé - 1959 -

"L'intelligence est une adaptation. Pour saisir ses rapports avec la vie en général, il s'agit donc de préciser quelles relations existent entre l'organisme et le milieu ambiant. En effet, la vie est une création continue de formes de plus en plus complexes et une mise en équilibre progressive entre les formes et le milieu. Dire que l'intelligence est un cas particulier de l'adaptation biologique, c'est supposer qu'elle est essentiellement une organisation et que sa fonction est de structurer l'univers comme l'organisme structure le milieu immédiat".

Le mot "organisation" est très important, car il contient deux acceptions :

I) l'organisation en tant que système d'opérations.

2) l'organisation en tant que résultat de ce système d'opérations.

Dans l'optique génétique de Piaget, on distingue six stades dans l'apparition de l'intelligence :

I) l'exercice des réflexes.

2) les premières adaptations acquises (réaction circulaire primaire).

3) les réactions circulaires secondaires et les procédés destinés à faire durer les spectacles intéressants.

4) la coordination des schémas secondaires.

5) la réaction circulaire tertiaire et la découverte des moyens nouveaux par expérimentation active.

6) l'intervention des moyens nouveaux par combinaison mentale.

Ce qui est essentiel ici, c'est l'existence d'un système de communication entre l'être intelligent et le monde extérieur, communications rendues possibles par un jeu complet de substitutions :

- substitution de sensations aux objets extérieurs.
- substitution d'excitations cérébrales aux messages sensoriels.
- substitution de "souvenirs" à des classes d'expériences.
- substitution de systèmes à des séquences de souvenirs isolés.
- substitution de concepts à des classes de systèmes.

1.213 - Le concept de l'intelligence d'après Bergson

Pour ce philosophe français de la première moitié du XXe siècle, il existe une distinction très nette entre l'intelligence et l'intuition.

L'intelligence serait essentiellement pratique et donnerait une représentation schématique, mécanique et par conséquent déformée et sans vie de la réalité. L'intuition par contre nous permettrait seule de saisir l'esprit dans sa réalité et son originalité. L'intuition serait le siège d'une force vivante et libre constamment créatrice : l'élan vital.

Il faut cependant souligner l'aspect "discernement" mis en évidence par ce philosophe lorsqu'il dit : "Conscience signifie hésitation et choix".

On peut mesurer combien la notion d'intelligence est susceptible de varier d'un auteur à l'autre.

1.214 - Le concept d'intelligence selon M. Paul BRAFFORT.

D'après cet auteur scientifique actuel,(2) si l'intelligence caractérisait certaines de nos activités supérieures, celles-ci pourraient présenter aussi bien un aspect passif, correspondant à une assimilation de messages venus de l'extérieur, qu'un aspect actif, en tant qu'intervention de l'individu dans le milieu qui est le sien. Le rôle de l'intelligence serait essentiellement d'assurer le succès de ces interventions, succès qui se situerait à des niveaux de satisfaction très variés mais qui en fin de compte mesurerait l'adaptation de l'individu à son milieu.

M. Paul BRAFFORT considère aussi qu'une des caractéristiques essentielles de l'intelligence naturelle est l'aspect de circularité qu'elle présente au bout d'une longue évolution. Cette circularité se manifesterait dans le fait qu'elle seule parmi les acquisitions successives des espèces, jouirait de la propriété d'être "réflexive", c'est-à-dire de pouvoir s'appliquer à soi-même. On peut en effet "penser à sa propre pensée "alors qu'on ne peut pas" voir l'acte de voir".

1.215 - Le concept d'intelligence d'après le Docteur SAUVAN

Selon ce médecin(3) on peut aborder le concept d'intelligence de deux façons : soit de manière classique comme l'ont toujours fait les psychologues de formation purement philosophique, soit d'une manière béhavioriste, comme le font les chercheurs généralement anglo-saxons, qui imaginent des "machines intellectuelles" et les comparent aux productions de la nature. Dans ce dernier cas, il ne s'agirait plus d'intelligence mais de comportement intelligent.

Pour cet auteur, il importe de faire une distinction entre l'intelligence et le comportement intelligent. L'intelligence concernerait l'homme, mais il serait cependant légitime de parler d'un comportement intelligent des machines.

Le Docteur SAUVAN définit le processus "intelligent" comme celui de la "réitération" avec amélioration chaque fois qu'on recommence l'opération. Par exemple, un conducteur au bout d'un certain temps, connaissant mieux sa route, finira par prendre le trajet qui lui demande le minimum de temps ou de fatigue. C'est le processus d'apprentissage.

(2) Paul BRAFFORT : "L'intelligence artificielle" - PUF 1968

(3) Le dossier de la cybernétique - Marabout 1968 - Chapitre : "L'intelligence artificielle" :mythe ou réalité:Dr SAUVAN.

1.216 - Concept d'intelligence d'après M. PITRAT (4)

Pour cet ingénieur, l'intelligence serait la faculté de faire un choix en utilisant au mieux les connaissances que l'on possède. Plus le choix réalisé est judicieux et plus on est intelligent. Le test de l'intelligence consisterait à voir si le sujet choisit une bonne réponse. Un problème exige le choix de bons théorèmes pour trouver la solution. Aussi est-il essentiel, pour évaluer l'intelligence, de tenir compte des connaissances acquises antérieurement par le sujet.

Par exemple, si dans un concours un sujet jeune réussit aussi bien qu'un sujet âgé, on estime que le plus intelligent est le plus jeune car ce dernier n'a pas eu le temps d'acquérir autant de connaissances.

1.217 - Conclusion

Il est facile de constater que pour le concept d'intelligence naturelle on se heurte à des divergences sérieuses en ce qui concerne sa définition. Il ne peut donc être question d'appréhender globalement ce concept.

Néanmoins, à la lumière des idées diverses et parfois contradictoires qui sont émises, il est possible de dégager un certain nombre de facultés qui peuvent entrer en ligne de compte dans l'élaboration d'un acte intelligent. Ces composantes seraient :

- la perception et la conception (philosophie classique)
- l'organisation (PIAGET)
- l'analyse (EINSTEIN)
- la synthèse (P. JANET)
- la logique (ARISTOTE)
- l'intuition (BERGSON)
- l'imagination (BACHELARD)
- le discernement (H. DELACROIX)
- la spontanéité (JAMES)
- le raisonnement (DESCARTES)
- la réflexion (PLATON)
- l'association (HUME)
- la mémorisation (PIERON)
- la substitution (PIAGET)
- la circularité et réflexivité (BRAFFORD)
- l'adaptation (PIAGET)
- le jugement (KANT)
- la compréhension (LAVELLE)

(4) Jacques PITRAT : "Simulation de l'intelligence sur machine (Automatisme - Juillet/Août 1962)"

A la suite d'une telle énumération, il ressort que l'intelligence doit disposer d'un ensemble de classifications qui permettent :

- de codifier de façon élémentaire des informations (substitution)
- de stocker la masse de ces informations codifiées (mémorisation)
- d'établir des ressemblances (association)
- de vérifier des cohérences (réflexion).

De toutes ces voies essayant d'analyser le "concept d'intelligence", nous retiendrons surtout la définition de M. PITRAT qui, à mon avis, se rapproche le plus de l'origine du mot latin "intelligere" :

"L'intelligence est l'aptitude à faire des choix qui donnent des résultats supérieurs à ce que donnerait le hasard. Meilleur est le choix et plus on a fait preuve d'intelligence".

## *1.22 - Les définitions de l'intelligence artificielle*

### 1.221 - Position du problème

S'il s'est avéré délicat de donner une définition globale de l'intelligence naturelle, il est tout aussi difficile de circonscrire avec précision le domaine de l'intelligence artificielle.

La plupart des auteurs admettent cependant qu'elle s'applique à l'utilisation de machines électroniques pour une classe de problèmes importante, mais spécifique. Or rien n'interdit que ce concept puisse s'adresser à d'autres types de machines (mécaniques, chimiques etc) puisque l'intelligence naturelle semble indépendante du support matériel qui lui permet de s'exercer. Il est permis de penser, avec P. BRAFFORT qu'un changement de support serait réalisable, allant par exemple du physiologique au mécanique, afin d'effectuer une simulation plus ou moins complète.

Bien que le domaine de l'intelligence artificielle soit mal défini, nous pensons avec M. Jacques PITRAT, que le but à long terme dans cette branche est d'essayer de donner à un automate des performances au moins égales à celles de l'homme le plus doué pour toutes les activités intellectuelles. S'il n'a jamais été démontré qu'une activité humaine ne pouvait être accomplie par un automate, force est de reconnaître que les meilleures expériences arrivent à peine actuellement, dans un domaine d'application très restreint, à réaliser des performances comparables à celles de l'homme.

En admettant que cette hypothèse de départ soit fausse et qu'un jour on découvre une activité humaine qu'aucun automate ne puisse exercer, un progrès énorme aurait été cependant réalisé, puisqu'à ce jour, on l'ignore encore. De toutes manières, quelqu'en soit l'issue, ce domaine réclame des travaux de longue haleine et comporte autant de voies de recherche qu'il y a de types d'activités humaines.

1.222 - Concept d'intelligence artificielle chez M. PITRAT (4) § 1.216

Selon cet auteur, pour être en droit de parler d'intelligence artificielle en ce qui concerne une machine programmée, il faut que le programme ait une certaine autonomie.:

"Il doit résoudre des problèmes sans que son programmeur soit sûr a priori qu'il le pourra et sans qu'il sache comment il y arrivera".

En quelque sorte une machine fait preuve de comportement intelligent si elle est capable de faire des choix judicieux dans des situations qui n'ont pas été prévues par son concepteur.

Si toutes les situations possibles devant lesquelles la machine peut se trouver ont été prévues à l'avance, et si on lui a indiqué la conduite à tenir, on ne peut pas parler d'intelligence de la machine. Mais il existe des cas où les solutions possibles sont telles qu'on ne peut toutes les prévoir. Par exemple, des démonstrations exactes de théorèmes obtenues dans certains programmes ont surpris les programmeurs eux-mêmes qui ne les connaissaient pas. Si le comportement de la machine est très souvent déterminé, il peut devenir imprévisible grâce à la complexité du problème. C'est en ce sens que la machine sera "autonome", et devra résoudre par elle-même les problèmes, en faisant des choix judicieux.

Ce même auteur distingue deux grandes directions d'études : l'intelligence artificielle pure et la simulation de l'intelligence.

La famille des chercheurs en intelligence artificielle pure ne s'intéresse qu'aux résultats. Ce qui compte avant tout, c'est d'obtenir un système qui donne les meilleures solutions possibles comparativement à celles que donne le cerveau humain. En vue de ce but, tous les movens peuvent être utilisés, car on ne se croit pas obligé d'employer les mêmes mécanismes que dans les systèmes neurophysiologiques. Il en résulte que les machines (fort nombreuses d'ailleurs) issues de cette école ont une structure très différente de celle du cerveau humain, et que ses mécanismes ne peuvent pas être comparés. Pour juger des performances d'un tel système (en principe il s'agit du programme) réalisé dans cet esprit, il faut s'attacher uniquement à la qualité des résultats.

La deuxième famille de chercheurs a pour ambition de créer des mécanismes qui imitent le comportement humain, y compris ses imperfections. L'approche se fait à deux niveaux différents : psychologique et neurophysiologique.

- approche par la psychologie : dans cette méthode, la principale difficulté provient du rôle considérable joué par l'inconscient dans la conduite de l'homme. Tout mécanisme inconscient échappe au puissant moven d'investigation qu'est l'introspection. Or la part de l'inconscient est particulièrement importante dans l'invention. De même l'inconscient jouerait un grand rôle dans la perception, qui est un phénomène quasi instantané. Nous verrons d'ailleurs plus loin au paragraphe (14) qu'il existe beaucoup de raisons de penser que notre cerveau travaillant en parallèle, un tel processus est forcément inconscient ; la conscience ne pouvant avoir accès qu'à un processus séquentiel. Par exemple, nous sommes incapables de définir les critères que nous utilisons pour reconnaître un caractère d'imprimerie ou un individu, et pourtant nous les reconnaissons instantanément.

- approche par la neurophysiologie : dans cette optique, on essaie de découvrir la loi de fonctionnement de l'élément actif du cerveau (le neurone) et la loi de connexion de ces éléments. Les études importantes de LETTVIN et AL, HUBEL et WIESSEL montrent que les neurones ne sont pas reliés entre eux au hasard, mais que les connexions semblent respecter des lois assez simples. Ces hypothèses paraissent se vérifier aussi par les travaux très intéressants de ROEDER (1) sur les insectes. Etant donné leur nombre de neurones beaucoup plus faible le mécanisme était plus facile à connaître.

En conséquence, ces études ont amené les constructeurs de machines en réseau à envisager des systèmes de connexions de leurs éléments basés sur autre chose que le hasard.

Pour conclure, on peut dire que la famille des chercheurs en simulation de l'intelligence est comparable à l'école qui prétendait que pour faire voler un objet, il fallait le doter d'ailes semblables à celles de l'oiseau, tandis que la famille des chercheurs en intelligence artificielle pure serait l'école de l'hélice... et maintenant des réacteurs ! Evidemment cet exemple est une image et ne présume en rien de l'avenir réservé à ces deux méthodes d'approche de l'intelligence artificielle. On pourrait d'ailleurs trouver dans l'histoire des sciences des contre-exemples où la méthode analogique a conduit au succès (voir expérience de MAREY, sur les jets d'eau au § 132).

1.223 - Le concept d'intelligence artificielle chez M. BRAFFORD

Selon cet auteur, l'intelligence artificielle serait le domaine des machines à calculer, de leur programmation lorsqu'il y est fait usage de processus déductifs, en particulier du calcul des prédicats. Dans cette optique les objets manipulés par les machines ainsi programmées peuvent être d'une essence non directement mathématique : faits, questions et réponses.

1.224 - Conceptions du Dr SAUVAN

Nous avons vu au paragraphe précédent que cet auteur faisait la distinction entre l'intelligence et le comportement intelligent. L'intelligence concernerait l'homme mais il serait possible de parler de la conduite intelligente d'une machine. Le jugement porte alors sur des performances sans que l'on se soucie de la nature des systèmes qui les réalisent.

Selon le Dr SAUVAN : "L'élaboration du concept relatif à une fonction intellectuelle unique définie, nommée intelligence ne concerne strictement que la pensée de l'homme. Parler de l'intelligence des machines serait proférer une absurdité au sens logique du terme, comme le serait par exemple la demande d'inscription au registre d'état civil de la naissance d'une amibe ou de la mort d'une étoile. Il ne peut s'agir que d'abus de langage".

(1) ROEDER - Nerve cells and insects behavior - Harward University - Press 1963

Il faut insister aussi sur la distinction que fait le Dr SAUVAN entre "l'intelligence des machines" expression dénuée de sens et "une machine intelligente". Sera dite machine intelligente toute machine capable de simuler l'intelligence humaine. Mais encore faut-il définir cette faculté et en démontrer la réalité, or personne n'a jamais pu obtenir un accord sur une définition de l'intelligence".

"Il y a, remarque-t-il, des individus qui ont des facultés d'analyse, d'autres de synthèse, des individus logiques ou intuitifs, il y a des imaginatifs et des associatifs, des spontanés ou des réfléchis. Chacune de ces facultés peut être un facteur important de ce que l'on appelle un acte intelligent. Mais il n'existe pas d'exemple d'individu ayant fait uniformément preuve d'intelligence dans ses études puis dans sa profession, dans la conduite de ses propres affaires, dans son comportement social et dans son comportement familial. Il n'existe pas de réussite éclatante totale. C'est pourtant ce que l'on devrait constater si l'intelligence était "une" et si elle saupoudrait indifféremment tous les comportements d'un homme".

*Remarque :*

En se basant sur les considérations précédentes, nous pouvons dire qu'une machine intelligente est capable de simuler certaines facultés seulement de l'intelligence humaine. Il est peut-être utopique de penser réaliser un jour une machine simulant toutes les facultés de l'intelligence humaine, car pour simuler, il faut posséder un modèle et en fait, le modèle de "super-intelligence" regroupant toutes les facultés intelligentes connues n'existe pas.

1.225 - Le test de TURING

Comme le processus d'éléboration de notre pensée est mal connu, nous ne pouvons estimer la valeur d'une réalisation d'après le programme, mais d'après les résultats et les intermédiaires comparés à ceux de l'être humain. Il est possible dans ce cas d'appliquer le fameux test de TURING :

S'il devient impossible un jour de savoir si un certain type de performance a été réalisé par un homme ou une machine, on pourra dire que la machine possède les facultés que l'homme a manifestées en réalisant cette performance.

Evidemment pour l'école des "simulateurs" de l'intelligence, ce test est sujet à caution. Comme le fait remarquer le Dr SAUVAN, des stratégies équivalentes ne sont pas élaborées par les mêmes processus cérébraux selon qu'il s'agit d'insectes, de vertébrés supérieurs ou de l'homme. Un navigateur, pour aller de SUEDE au CAP HORN, n'emploie pas les mêmes procédés "mentaux" qu'un grand migrateur.

1.226 - Notion d'imagination artificielle chez le Professeur KAUFMANN

1) Introduction :

L'imagination étant une composante de l'intelligence, il convient de remarquer que la même comparaison vue précédemment pour l'intelligence peut être tentée en ce qui concerne l'imagination. Pour cet auteur, l'imagination artificielle consisterait à examiner l'élaboration du processus de créativité humaine et à le transposer sur machine.

Etant donné la difficulté de l'étude, il est toujours possible de se donner un système d'hypothèses sur la nature de l'imagination. La part d'arbitraire sera donc très importante.

2) Idée fondamentale :

Elle consiste à retransposer un objet de la pensée en un mécanisme appelé "assemblage" qui lui, est soumis à l'analyse. Cet assemblage est ramené à une structure de vecteurs. L'imagination serait le fait de reconstruire d'autres assemblages avec la structure de l'initial. La transformation d'un assemblage en d'autres assemblages permettrait de formuler de nouveaux objets de la pensée.

Le processus d'imagination pourrait se représenter par la chaine ci-dessous qui conviendrait assez bien pour simuler l'imagination humaine :

objet perçu → assemblage → nouveaux assemblages → nouveaux objets

A partir de cet enchaînement, il est possible de reconstituer le processus d'imagination sur machine. Dans ce cas précis, la machine présente un grand intérêt, car l'être humain traite très mal et très lentement le combinatoire au niveau de l'élaboration de nouveaux assemblages. C'est à ce niveau que le couple homme-machine se révèlerait performant.

1.227 - Les formes d'intelligence artificielle

Les auteurs anglo-saxons en distinguent généralement quatre :

1) La reconnaissance des formes :

Il s'agit de la théorie des Perceptions étudiée soit sur des modèles construits, soit en simulation par programme d'ordinateur.

2) La solution de problèmes complexes par des méthodes heuristiques :

Les problèmes sont généralement ramenés à celui du HILL CLIMBING. L'élaboration d'une solution peut se représenter par une recherche de trajectoire dans un espace à autant de dimensions qu'il y a de variables. Les bonnes solutions, dites "optimisantes" sont caractérisées par la recherche du plus haut sommet d'une surface de cet espace.

3) Le problème de l'apprentissage :

Il existe un grand nombre de machines ou de programmes d'apprentissage soit à sanction externe soit auto-adaptatives comme celles du professeur WIDROW.

4) Le problème de choix d'une stratégie :

Il s'agirait là de programmes d'ordinateurs chargés d'appliquer selon une méthode parfaitement définie par le programmeur, des modes d'évaluation de situations complexes.

1.228 - Conclusions

De toutes ces considérations, nous dirons qu'une machine relève du domaine de l'intelligence artificielle si elle satisfait au minimum à l'un des critères suivants :

- critère 1) Test de TURING :

Si au vu de ce qui sort d'une machine, un observateur ne peut déceler si cela a été produit par un homme ou par une machine, alors le principe de cette machine relève du domaine de l'intelligence artificielle.

- critère 2) :

Une machine sera considérée comme ayant une manière d'agir intelligente si elle est capable de faire des choix judicieux dans des situations qui n'ont pas été prévues par son concepteur.

- critère 3) :

Sera dite machine intelligente toute machine capable de simuler l'intelligence humaine.

- critère 4) :

Une machine fait preuve d'un comportement intelligent lorsqu'elle est capable de faire en moyenne des choix meilleurs que ceux que donnerait le hasard.

- critère 5) :

Pour qu'une machine puisse être rattachée au domaine de l'intelligence artificielle, elle devra résoudre des problèmes sans que son programmeur soit sûr a priori qu'elle en sera capable, et sans qu'il sache comment elle y parviendra.

En résumé, le domaine de l'intelligence naturelle est celui de la psychologie, de la psychophysiologie et de la psychopathologie. Le domaine de l'intelligence artificielle est beaucoup plus restreint. Il s'agit de l'utilisation de machines pour une classe de problèmes importante mais spécifique.

Son utilisation est basée soit sur la recherche d'un résultat, ou au contraire sur la simulation de l'intelligence. Dans ce dernier domaine, il faut noter que les analogies les plus prometteuses reposent sur les machines dites "en réseau" qui se proposent d'imiter l'aspect physiologique du cerveau humain.

## 1.3 - APERCU HISTORIQUE

### 1.31 - La naissance et l'évolution de l'intelligence artificielle - Principaux artisans

La naissance de l'intelligence artificielle est étroitement liée à un facteur né au Moyen Age, et qui deviendra plus tard la caractéristique de l'ère des ordinateurs : l'esprit combinatoire. C'est probablement Raymond LULLE (1232-1315) qui a révélé cette préoccupation dans son "Ars Magna". Dans cet exposé, il construit des assemblages de catégories, de propriétés, de vertus en s'efforçant de fournir une liste exhaustive des combinaisons possibles. Pour résoudre ces problèmes, LULLE construisit deux sortes de méthodes (qu'on appellerait maintenant algorithmes). Les unes étaient graphiques, les autres reposaient sur des éléments mécaniques (cercles concentriques pouvant se mouvoir les uns par rapport aux autres).

Bien que ces systèmes n'aient pas fait preuve de comportement intelligent, ils ont eu cependant le mérite d'être à l'origine des travaux de LEIBNIZ (1646-1716) qui peut être considéré comme le premier grand pionnier de l'intelligence artificielle avec sa théorie appelée "Caractéristique" qui en donnait la définition suivante (1) :

"C'est le but principal de cette grande science que j'ai accoutumé d'appeler Caractéristique, dont ce que nous appelons l'algèbre n'est qu'une branche fort petite. Car c'est la caractéristique qui donne les paroles aux langues, les lettres aux paroles, les chiffres à l'arithmétique, les notes à la musique ; c'est elle qui nous apprend le secret de fixer le raisonnement et de l'obliger à laisser comme des traces visibles sur le papier en petit volume, pour être examiné à loisir ; c'est enfin elle qui nous fait raisonner à peu de frais en mettant des caractères à la place des choses pour désembarrasser l'imagination".

L'originalité des idées de LEIBNIZ est contenue dans ce programme gigantesque, la Monadologie, comme le calcul infinitésimal, mais également dans des projets plus spécifiques de machines à calculer. Après les machines arithmétiques et algébriques conçues dans sa jeunesse, il imagine "une grammaire cylindrique" qui fournirait tous les théorèmes appartenant à un système formel donné et envisage même l'application de ce mécanisme à la résolution de problèmes de droit. Plus tard, il se rend compte de l'intérêt du problème des jeux comme exemple de problème combinatoire. Aussi peut-on dire qu'avec LEIBNIZ la combinatoire est commencée, tout au moins sous son aspect numérique.

(1) Cité par L. COUTURAT dans la logique de LEIBNIZ, réédition GOMS 1961 et reproduite dans l'intelligence artificielle de Paul BRAFFORT - PUF 1968.

Au 19e siècle, Charles BABBAGE (1792-1871) mit au point et réalisa partiellement une machine qui contenait déjà les organes de mémoire, et l'organisation logique de nos machines à calculer électroniques. Cependant faute de moyens, (l'électronique en particulier) suffisamment souples, la réalisation pratique de la machine fut un échec. Mais il faut souligner que les intérêts de BABBAGE le portaient bien au-delà du seul calcul automatique. Il avait étudié en outre, certains concepts utilisés de nos jours en recherche opérationnelle tels que la simulation par automate, du jeu de Tic-Tac-Dou. BABBAGE peut donc être considéré comme un ancêtre de l'intelligence artificielle.

Bien que l'on puisse remonter à Raymond LULLE, c'est cependant le 20e siècle qui donnera le plus de noms célèbres. Parmi ces contemporains qui ont contribué directement ou indirectement au développement de l'intelligence artificielle, il convient de citer :

1) G. POLYA qui a fait des travaux remarquables sur l'analyse combinatoire et l'heuristique mathématique.

2) G. SHANNON qui a joué un rôle très important dans la théorie de l'information, la théorie des automates et la simulation des jeux.

3) A. TURING qui a introduit la notion fondamentale de machine abstraite et a participé notablement à la prise des premières décisions sur l'intelligence artificielle.

4) Y. BAR-HILELL et R. CARNAP qui ont précisé la notion informatique sémantique : travaux qui se situent à la frontière de la logique et de la linguistique.

5) N. CHOMSKY qui a opéré un rapprochement intéressant entre syntaxe structurale et théorie des automates.

6) R. ASHBY
7) D. MAC KAY
8) W. MAC CULLOCH
9) W. PITTS
10) G. WALTER
11) M. WIENER
12) J. VON NEUMANN

} qui ont procédé à des recherches variées mais fondamentales et convergentes sur le problème général des automates.

Il faut souligner que tous ces travaux sont antérieurs à 1955.

Bien que les premières machines à calculer électroniques aient été construites à la fin des années 1940 dans les organismes publics des USA et de l'ANGLETERRE, elles ont d'abord été utilisées pour résoudre des problèmes urgents. C'est beaucoup plus tard qu'apparaissent des applications de caractère aventureux, telles que celles qui sont liées aux problèmes d'intelligence artificielle.

A partir de ces nouvelles applications, citons les études de A. BERNSTEIN, A. TURING, C. SHANNON, S. ULAM, puis les grands travaux de A. NEWELL, Jc SHAW et H. SIMON (13). Il faut souligner aussi les recherches de J Mc CARTHY et en URSS celles de SHURA-BURA qui portaient sur le jeu d'échecs.

Le jeu de dames fut étudié avec succès par A. SAMUEL (14). D'autres jeux ont été abordés : le Go par A. REMUS, le Go-Bang par B. BRAFFORT, A. LUSSAN et H. HEDEL.

En linguistique, les pionniers se nomment : L. DOSTERT, S. CECCATA, A. OETTINGER, U. YNGUE, O. KULAGINA, M. MASTERMAN, I. MELCHUK, D. HAYS puis leurs successeurs ; P. GARVIN, H. HIZ, D. LEHMAN, S. RENDERGRAFT, Y. LECERF, L. HIRSCHERG, S. GREIBACH, GKING et SKUNO.

En traduction automatique, les noms célèbres sont ceux de : P. LUHN, C. MOOERES, M. MARON, A. PARKER RHODER ainsi que DOYLE, A. LEROY, R. SIMMONS, V. GIULIANO, R. NEEDHAM, P. EDMUNDSON.

En documentation automatique, nous trouvons : M. TAUBE, JC. GARDIN et plus tard G. SALTON et DEWEZE.

Pour les applications diverses, signalons E. FEIGENBAUM, J. FELDMAN, (auteurs de l'ouvrage remarquable : Computers and Thought) R. FRIEDBERG, B. GREEN, M. KOCHEN, A. ANDREW, H. BOVTO, G. PASK, N. ROCHESTER, R. SOLOMONOFF et F. TONGE, puis S. AMAREL, F. BLACH, D. BOBROW, R. KIRSCH, P. ARMER, R. LINDSAY, et surtout H. WANG (15) en démonstration automatique des théorèmes.

Des progrès significatifs ont été réalisés récemment en démonstration automatique des théorèmes avec D. PRAWITZ, J. SLAGE, A. ROBINSON, J. ROBINSON, L. WOS, G. COLLINS, B. DUNHAM, J. FRIEDMANN, S. KANGER, D. LEHMER, S. VAN WESTRHENEN.

Enfin quatre noms émergent de cette liste de chercheurs : M. MINSKI (16) et O. SELFRIDGE aux U.S.A., D. LYAPUNOV (17) en U.R.S.S. et F. Le LIONNAIS (18) en FRANCE, à cause de leurs publications remarquables.

Ouvrages des auteurs indiqués ci-dessus :

(1) G. POLYA : Introduction an Analogy in Mathematic. Princeton U.P. 1954.

(2) C. SHANNON - W. WEAVER : The mathematical theory of communications un of 111 Press 1949.

C. SHANNON et J. MAC CARTHY, Automata Studies Princeton U.P. 1956.

(3) Proc. Of the London math. Soci 42,230 - 1937.

cf. dans le livre de FEIGENBAUM et FELDMAN : Computers and Thought - MAC GRAW-HILL - 1963.

(4) cf. British J. of Philosophy of Scince 4,127, 1953.

(5) cf.J.of Symbolic Logic 18, 242, 1953.

(6) cf. Design for a brain J. WILEY, 1952.

(7) cf. British J. of Philosophy of Science 2, 105, 1951.

(8) et (9) cf. Bull of Mathematical Biophysics 7,89, 1943.

(10) The Living Brain, Norton 1953.

(11) cf. Cybernetics Hermam 1946.

(12) The computer and the brain Yale Univ Press 1958.

(13) cf. IBM Journal of Research and Developpement 2, 320, 1958.

(14) cf. IBM Journal of Research and Developpement 3, 210, 1959.

(15) cf. IBM Journal of Research and Develpppement 4, 2, 1960.

(16) Importante bibliographie sur l'intelligence artificielle dans le livre Computers and Thought de FEIGENBAUM et Feldman.

(17) Contribution dans la publication de la revue "Problème Kybernetiniki".

(18) Chapitre important sur la cybernétique dans l'histoire générale des sciences, PUF.

### *1.32 - Le cheminement du raisonnement analogique*

La complexité des êtres vivants a conduit depuis longtemps à leur appliquer le raisonnement analogique au moyen de modèles.

On a construit de nombreux modèles physiques des phénomènes biologiques, depuis DESCARTES qui cherchait un modèle de la circulation du sang dans les circuits hydrauliques des fontaines lumineuses jusqu'à VAUCANSON qui a construit son célèbre canard. Cet animal artificiel n'a pas été conçu, ainsi qu'on le croit communément, comme un jouet, un peu dans la lignée de certains automates de l'époque, mais bien à la demande des médecins pour servir de modèle dans l'étude de la digestion. L'animal artificiel picore, broie des grains et expulse le produit, donnant ainsi une image des phénomènes mécaniques de la digestion.

Malheureusement la digestion est essentiellement faite de phénomènes chimiques dont le "canard" ne donne aucune image. Comme on le voit, ces modèles manquaient de fidèlité et n'étaient que de très imparfaits simulateurs. Par contre, nombre d'entre eux ont apporté une confirmation à la conception générale suivant laquelle les phénomènes de la vie, psychologie comprise, peuvent être considérés comme des phénomènes physico-chimiques.

Le cheminement de la pensée est jalonné par les expériences suivantes :

1) MAREY en 1880 montre que les jets d'eau pulsés se transforment dans un tuyau de caoutchouc assez long en un courant régulier. Les biologistes admettent depuis qu'il n'est pas besoin, pour expliquer le phénomène de régularisation du flux sanguin dans les artères, d'imaginer une commande des artères par les centres nerveux.

2) RALPH LILIE, 1925, montre qu'un fil de fer pur plongé dans de l'acide nitrique dilué, transforme une excitation appliquée à l'une de ses extrémités en une onde électrique qui parcourt le fil d'un bout à l'autre. Les neurologues admettent dès lors que l'explication de la transmission de l'influx nerveux n'exige pas de concept de l'ordre de la psychologie.

RALPH LILIE a réalisé son expérience de la manière suivante : Un fil de fer, placé dans une solution concentrée d'acide azotique, se recouvre d'oxyde de fer. Si l'on place ce fil de fer, ainsi oxydé en surface, dans une solution plus diluée, rien ne se passe. Par contre si l'on stimule d'une façon mécanique ou électrique le fil de fer pour arracher la pellicule oxydée en un point, on donne naissance à une vague d'oxydo-réduction qui se propage tout au long du fil de fer, suivie de la formation d'une nouvelle couche.

Après une "période réfractaire", une autre stimulation entraîne une nouvelle vague oxydo-réductrice. Or si le fil de fer est placé dans des segments de tube de verre, la vague saute d'un noeud exposé à un autre. Ainsi ce modèle fournit l'analogie de l'aspect physique de la propagation de l'influx nerveux.

3) GREY WALTER (1948) montre qu'un mécanisme électronique (les tortues) à déplacement autonome et muni d'organes sensibles au contact et aux sons simule le comportement de réflexe conditionné. Les psycho-physiologues admettent dès lors que le réflexe conditionné est un phénomène physiologique dont l'explication n'exige pas de concept de l'ordre de la psychologie.

4) Le Dr SAUVAN (1958) présente au 2e Congrès international de Cybernétique de NAMUR un mécanisme qui simule la création de l'instinct. Les psychologues dès lors, abandonnent à la physiologie les phénomènes attribués à l'instinct.

5) De nos jours, les machines à calculer peuvent effectuer toutes les opérations logiques qu'effectue l'esprit humain, notamment construire une théorie dédductive. Il devient pensable d'admettre que la construction des mathématiques n'exige pas la mise en oeuvre d'une "faculté de l'esprit", comme celle de l'intelligence par exemple.

### *1.33 - Conclusions*

Parmi la liste assez impressionnante des chercheurs, précédemment cités on peut constater que la plupart d'entre eux appartiennent à l'école de "l'intelligence artificielle pure", c'est-à-dire celle des savants qui se sont efforcés de construire des machines qui donnent avant tout les meilleurs résultats possibles, comparativement à ceux que pourrait donner le cerveau humain.

La deuxième école orientée vers l'aspect "simulation de l'intelligence" est représentée surtout par quelques pionniers de formation médicale, tels que :

- W. MAC CULLOGH, W. PITTZ (biophysiciens)

- ROSS ASHBY (psychiatre)

- G. WALTER (physiologue)

- FEIGENBAUM et FELDMAN

et plus récemment un biologicien français, le Docteur SAUVAN.

Signalons à l'heure actuelle également :

L'Institut de Cybernétique de KIEV (U.R.S.S.) et,

L'Institut de Bioscience de l'Université de SOUTH-CALIFORNIA (U.S.A.)

qui ont acquis une certaine réputation par leurs recherches en bionique.

Cet historique montre que la voie de la simulation basée sur la neurophysiologie a été assez peu explorée et qu'elle peut de ce fait nous apporter beaucoup dans l'avenir.

## 1.4 - LES MACHINES en RESEAU

Introduction

Ce type de machine qui, ainsi qu'il a été vu au paragraphe 1.228 semble très prometteur, essaie d'imiter l'aspect physiologique du cerveau humain et notamment celui de ses cellules de base : les neurones. Cette structure "en réseau" devra donc satisfaire en premier lieu, à notre critère III : "Sera dite machine intelligente, toute machine capable de simuler l'intelligence humaine". Par suite, naturellement, elle pourra vérifier un ou plusieurs des quatre autres critères. (Voir § 1.228).

Cette étude neurophysiologique peut en effet paraître très tentante du fait que le neurone semble posséder des fonctions d'excitabilité et de conductibilité, fonctions qu'il est a priori possible de recréer avec des circuits électriques et électroniques. Cela nous amène à considérer la cellule nerveuse sous un angle médical d'abord puis sous l'aspect "simulation". Cette étude nous permettra d'introduire des exemples de machines en réseau et notamment celle du Dr SAUVAN.

### 1.41 - Le neurone

#### 1.411 - Généralités

Depuis la théorie du neurone de WALDEYER qui est à l'origine des publications de RAMON Y CAJAL, il est presque universellement admis que cette cellule constitue l'élément fondamental de base de toute architecture nerveuse.

Le neurone est considéré comme une unité morphologique sans continuité avec les autres neurones. Il représente une unité pathologique car la mort du neurone ne touche que lui. D'autre part, c'est une unité fonctionnelle, car elle jouit du monopole du transport de l'influx nerveux.

#### 1.412 - Aspect qualitatif du neurone

Les neurophysiologistes actuels donnent du neurone une image idéale où il est réduit à ses éléments essentiels :

a) Le corps du neurone qui est une plage de protoplasme entourant un gros noyau et son nucléole. Ce corps de cellule est aussi appelé "périkarvone" (autour du novau).

b) Les prolongements : ce sont des expansions de la substance du protoplasme périnucléaire qui se divisent suivant leur forme et leur fonction en prolongements protoplasmiques et prolongements cylindraxiles.

Le prolongement protoplasmique ou dendritique ou dendrite est rarement unique, mais au contraire se termine par de multiples ramifications (plusieurs dizaines).

Le prolongement cylindraxile ou axone ou neurite est par contre unique et régulièrement calibré. Il émet d'ailleurs de place en place des rameaux ou collatérales. En règle générale, dendrite et axone émergent aux deux pôles opposés du corps cellulaire. L'ensemble du neurone est parcouru de bout en bout par de très minimes filaments les neurofibrilles, qui jouent un rôle essentiel dans le transport de l'influx nerveux.

Les dimensions du neurone sont très variables. (Voir fig. 14a). Elles peuvent aller de quelques microns (neurones du cerveau) à un mètre (neurones de la moëlle épinière).

Le corps cellulaire du neurone peut être triangulaire, arrondi ou étoilé. Les axones, ainsi que les dendrones sont entourés d'une gaine de fraisse phosphorée : la gaine de myéline. Toutes ces particularités jouent un rôle dans la production et la vitesse de l'influx nerveux et créent les distinctions entre les principaux types de neurones qui constituent les voies nerveuses.

1.413 - Aspect fonctionnel des neurones (fig. 14 b)

Il est intéressant de noter qu'au schéma anatomique se superpose exactement un schéma fonctionnel qui peut se résumer dans la loi de la polarisation dynamique :

- dans la dendrite, l'influx nerveux va de l'extrémité libre au corps cellulaire, il est cellulipète.

- dans le cylindraxe, l'influx va du corps cellulaire aux extrémités du cylindre : il est cellulifuge.

Chaque neurone présente donc deux pôles : un pôle percepteur situé à l'extrémité des prolongements protoplasmiques, un pôle effecteur situé à l'extrémité du cylindraxe.

Les neurones sont souvent connectés bout à bout comme les maillons d'une chaîne : c'est ce qu'on appelle la théorie caténaire (voir figure 14 c). Il est évident que ces chaînes neuronales ne peuvent fonctionner que si elles obéissent elles-même à la loi de polarisation dynamique. Il existe cependant des exceptions où l'influx nerveux ne traverse pas obligatoirement le corps cellulaire, ce qui permet d'expliquer le phénomène du réflexe d'axone (fig. 14 d). Dans ce cas, l'influx revient à la périphérie en empruntant un segment de dendrite normalement préposé à la seule conduction cellulipète.

## 1.414 - Les articulations interneuronales

### 1.4141 - Principe

On a d'abord cru que les neurones se fusionnaient entre eux pour constituer finalement une sorte de réseau neurofibrillaire diffus (théorie de GERLACH).

Aujourd'hui il est bien admis que chaque neurone d'une chaîne donnée conserve son autonomie et que son articulation avec le neurone voisin se fait par contiguïté et non par continuité de substance. D'autre part le passage de l'influx d'un neurone à un autre, ou du neurone terminal à l'organe innervé relève de deux sortes d'éléments, l'un anatomique, la synapse, l'autre chimique : les médiateurs.

### 1.4142 - La synapse (fig. 14 e)

C'est le point de contact entre deux neurones, constituant une barrière que l'influx nerveux doit franchir. La jonction entre deux neurones met en présence la terminaison nerveuse de l'axone renflé en bulbe ; ou terminaison présynaptique. La surface de contact que lui offre le neurone suivant est appelée surface postsynaptique.

La terminaison présynaptique et la surface postsynaptique sont séparées par un espace de 20 microns, appelé fissure synaptique. Le temps de franchissement de l'espace intersynaptique par l'influx est de l'ordre de 0,5 ms et s'appelle délai synaptique. Les articulations synaptiques sont très nombreuses, plusieurs centaines pour un même neurone. Chaque neurone est ainsi soumis à de multiples influences les unes agissant dans le sens de la facilitation, les autres dans le sens de l'inhibition du neurone considéré.

Etant donné que le nombre de neurones du cerveau humain est évalué à $10^{10}$, si l'on considère qu'un neurone possède en moyenne 500 articulations synaptiques, cela représente des articulations interneuronales possibles de l'ordre de $(500)^{10^{10}}$.

### 1.4143 - Les médiateurs chimiques

L'influx qui parvient au bulbe présynaptique est cependant trop faible pour franchir l'espace synaptique. Des substances chimiques, les médiateurs vont l'y autoriser. Ces substances sont élaborées dans le corps du neurone, transportées à travers l'axone jusqu'au bulbe où elles sont stockées sous forme de vésicules. L'arrivée de l'influx entraîne la libération des médiateurs qui permettent son passage à travers l'espace synaptique jusqu'au neurone postsynaptique. Aussitôt après, ils sont détruits et résorbés, ce qui prévient toute prolongation de leur action. Dans le cerveau il y aurait l'acide glutamique comme médiateur d'excitation et l'acide aminobutyrique comme médiateur d'inhibition. Suivant la nature du médiateur, la connexion interneuronale se fait ou ne se fait pas

### 1.4144 - Les relations entre neurones

On a vu que par l'intermédiaire des médiateurs, un neurone peut exciter ou inhiber le neurone voisin. D'autre part pour exciter un neurone, plusieurs synapses (au moins 2) doivent être simultanément activées au-dessus du seuil.

Terminologie

Convenons de représenter un neurone par le symbole △. Une synapse d'excitation sera figurée par un point sur le corps cellulaire, une synapse d'inhibition par une bande autour de la dendrite apicale.

neurone : △

synapse d'excitation :

synapse d'inhibition :

Exemple

Dans le diagramme de la figure 14144 a, l'activation du neurone 2 au temps t est en fait équivalente à la décharge du neurone 1 au temps t - 1, le temps étant compté en unités de délais synaptiques.

La figure 14144 b illustre le cas où l'activation du neurone 3 est en fait équivalente à la décharge du neurone 1 ou 2 ou les deux à la fois.

Cette représentation serait équivalente à une fonction logique où (3) = (1) + (2)

A la figure 14144 c, le neurone 3 est activé quand 1 et 2 se déchargent simultanément mais non séparément (car 2 synapses au moins doivent être excitées pour activer un neurone). Ce mode de fonctionnement est équivalent à une fonction logique ET

$$(1) = (1) \cdot (2)$$

La figure 14144 d montre que l'activation de (3) est en fait équivalente à la décharge de (1) sans décharge de (2), cela donnerait l'équation logique :

$$(3) = (1) \cdot \overline{(2)}$$

Par combinaison de ces couplages élémentaires entre neurones il est possible de former un réseau approprié capable de convertir un rythme en des phénomènes distribués d'une manière spatiale (voir figure 14144 e). D'où les équations logiques :

B2 = A1, C1 = A1, B3 = B2, C2 = A1 . B2, C3 = 0
(1 seule synapse étant insuffisante pour exciter un neurone).

L'introduction de la notion de synapses inhibitrices permet de construire un réseau de neurones dans lequel la fréquence d'un signal afférent peut être changée en une autre fréquence générant un autre signal afférent (voir fig. 14144 f).

Soit T un opérateur de translation

$B1 = (T)\ A$ $\qquad$ $C1 = (T)\ B1 = (2T)\ A$

$B2 = (T)\ B1 = (2T)\ A$ $\qquad$ $C2 = (T)\ B2 \cdot (T)\ \overline{C1}$

$B3 = (T)\ B2 = (3T)\ A$ $\qquad$ $C3 = (T)\ B3 = (4T)\ A$

$B4 = (T)\ B3 = (4T)\ A$ $\qquad$ $C4 = (T)\ \overline{C3} \cdot (T)\ B4$

$B5 = T\ (B4) = (5T)\ A$ $\qquad$ $C5 = T\ B5$

Finalement $C2 = (3T)\ A \cdot (3T)\ \overline{A} = 0$

$C4 = (5T)\ A \cdot (5T)\ \overline{A} = 0$

$D = C1 + C2 + C3 + C4 + C5$

Donc $D = C1 + C3 + C5$

Le réseau de la figure 14144 f permettra seulement aux fréquences 1, 3 et 5 d'apparaître dans le signal afférent si l'influx est conduit aux fréquences maxima.

Pour des influx de fréquences inférieures, des neurones de relais devraient être ajoutés dans les voies inhibitrices de la rangée C.

L'influx d'excitation sera continu dans la 2e rangée mais présentera une suite d'excitations et d'inhibitions dans la 3e rangée. Celle-ci recevra des décharges successives discontinues, suivant un rythme fait d'excitations et d'absences d'excitations. Comme la synapse fait subir à l'influx le délai synaptique de 0,5 ms, on pourra connaître la fréquence du rythme sur le neurone terminal D. Ainsi on conçoit que des changements de fréquence à partir du signal initial modifient le rythme imposé par les réseaux de neurones que traverse l'influx (voir fig. 14144 g).

A ce sujet, MM. CULLOGH et PITTS ont montré que si l'on admet des réseaux circulaires fournis en afférences et efférences convenables, on pourrait calculer n'importe quel nombre aussi bien qu'une machine de TURING. Ces auteurs ont eu le grand mérite de mettre en valeur les équivalences pouvant exister entre le calcul logique et l'examen statistique des fréquences de l'influx nerveux.

## *1.42 - Aperçu sur la physiologie neuronale*

### 1.421 - Electrogenèse nerveuse

Le corps cellulaire du neurone et de l'axone sont le siège de phénomènes électriques (voir fig. 1421 a). Il est démontré expérimentalement qu'il existe une différence de potentiel entre l'intérieur et l'extérieur d'une cellule. Si la cellule est au repos, la tension entre A et B est appelée potentiel de repos (ou potentiel de lésion).

Si la cellule est excitée en faisant une lésion traumatique, électrique, thermique ou chimique en un point, on observe une variation du potentiel de lésion selon une onde dite : onde monophasique. A ce moment, il y a dépolarisation de la membrane qui caractérise le potentiel d'action. Le courant d'action correspondant à l'onde monophasique est suivi de potentiels négatifs puis positifs, qui sont l'expression de processus métaboliques de réparation.

D'autre part, la négativité passagère apparue au point de lésion se déplace à une certaine vitesse et dans les deux directions à la périphérie du neurone, tandis qu'au fur et à mesure, les régions précédemment rendues négatives reconstituent leur positivité et retournent à l'état de repos. C'est ce déplacement de la vague de dépolarisation qu'on appelle : l'influx nerveux, et qui peut être enregistré à l'oscillographe, sous la forme d'une onde dite "onde diphasique". Ainsi mesure-t-on toute la valeur du modèle de RALPH LILLIE, basé sur la propagation de la vague d'oxydo-réduction d'un fil de fer et simulant ainsi la propagation de l'influx nerveux.

Il faut bien voir que si une perturbation électrique se propage le long du nerf, cela ne veut pas dire qu'il conduit l'électricité. Un courant électrique peut être conduit dans un nerf refroidi à 0°, mais un influx nerveux ne peut être propagé par le nerf dans ces conditions.

Une différence essentielle apparaît sur les enregistrements oscillographiques distinguant le premier du second. En effet s'il s'agit d'un courant lésion, l'onde enregistrée est monophasique. S'il s'agit de deux électrodes placées à distance sur un nerf excité en amont mais sain, l'onde enregistrée est diphasique et sa forme dépend de la longueur du nerf séparant les électrodes. En effet dans ce cas chacune de celles-ci devient négative à son tour, au passage de l'onde de dépolarisation.

1.422 - L'onde monophasique (voir fig. 1422 a)

Son intensité ne dépasse pas 0,03 volts. Sa forme est asymétrique car la partie ascendante dure moitié moins de temps que la partie descendante. La durée totale de l'onde est toujours une fraction de seconde (une ou deux ms pour les nerfs moteurs de l'homme).

1) Cette onde monophasique est appelée potentiel d'action de pointe (spike potential) pour le distinguer des variations de potentiel plus faibles et plus lentes.

Il faut noter que le froid et les anesthésiques l'altèrent, mais si l'anesthésie l'atteint en un point limité sans supprimer la propagation, au-delà de ce point, l'enregistrement du potentiel d'action retourne à sa valeur normale sans diminution d'amplitude.

2) Après passage de l'influx en un point quelconque d'un neurone, apparaît une période réfractaire pendant laquelle le neurone va retrouver sa faculté de réagir au stimulus. Cette période réfractaire se décompose comme suit :

a) une période réfractaire absolue, qui correspond au moment où le "spike" apparaît. Le spike est la pointe du potentiel d'action, d'amplitude constante pour un neurone donné et qui demeure identique sur toute l'étendue de ce neurone. Aucune activité supplémentaire ne peut être provoquée par un choc, de quelque intensité qu'il soit, tant que le maximum du potentiel d'action n'a pas été obtenu.

b) Au contraire, pendant une courte durée consécutive à la période ascendante, une excitation violente peut agir sur le neurone. C'est la période réfractaire relative.

c) Celle-ci est suivie par le potentiel tardif qui dure 10 à 15 ms. Le nerf est alors hyperexcitable, il est dans un état supranormal.

d) Le potentiel tardif positif qui dure beaucoup plus longtemps de 60 à 80 ms. Ce potentiel est positif, c'est-à-dire dans le sens inverse à toute la phase d'hypoexcitabilité (subnormale).

Les deux périodes où le nerf est hypoexcitable correspondent : la première (spike) à une dépolarisation exagérée, la seconde (potentiel tardif) à une surpolarisation.

L'enregistrement de la fig. 1422 a est donné par Henri LABORIT dans son ouvrage "La physiologie humaine". Il est obtenu en introduisant une microélectrode dans la cellule nerveuse ou musculaire, l'autre électrode demeurant en surface du nerf.

## 1.423 - L'onde diphasique (fig. 1423 a)

### 1.4231 - Généralités

Cette onde correspond au contraire à l'enregistrement d'une onde de dépolarisation se propageant le long du nerf. Elle permet de préciser la vitesse de propagation de l'influx. Cette vitesse ne dépend pas de la nature ni de l'intensité de l'excitant. Elle dépend par contre du diamètre de la fibre nerveuse, de sa nature et de sa température.

La vitesse est proportionnelle au diamètre et, comme tout phénomène biologique, elle croît avec la température à l'intérieur de certaines limites. Ceci est assez normal puisque la température croît avec l'agitation moléculaire et que parallèlement l'énergie d'activation diminue.

Les caractéristiques du stimulus ont cependant une grande importance. D'autre part le neurone obéit à des lois d'excitabilité, si bien que l'apparition de l'onde diphasique dépend avant tout de ces paramètres :

### 1.4232 - Caractères du stimulus

Pour réaliser l'excitation d'un neurone supposé excitable, il faut que l'excitant présente :

1) une certaine valeur :

Lorsqu'elle est suffisante pour provoquer la réponse, cette valeur atteint le seuil. Celle qui obtient le plus grand effet possible est appelée stimulus maximum.

2) une certaine intensité :

Celle-ci est donnée par la variation du potentiel énergétique, selon la nature du stimulus (chimique, thermique, électrique, mécanique) l'écart de température, la tension, la hauteur de chute, la masse (pour un corps qui tombe sur un nerf et provoque une lésion).

3) une certaine vitesse de rétablissement :

Au cours de l'excitation existent deux périodes, l'une pendant laquelle se produit la variation de potentiel énergétique (phase variable), l'autre pendant laquelle ce potentiel établi ne varie pas (phase constante). Seule la phase variable est excitante. Aussi un stimulus en créneaux est beaucoup plus efficace qu'un stimulus progressif ou en trapèze.

4) une certaine durée :

Il existe donc une relation entre l'intensité et la durée de l'excitation qui caractérise le seuil d'excitabilité. (Voir fig. 1423 b).

Si on détermine d'abord le voltage minimum nécessaire pour qu'un courant de durée infiniment prolongé soit efficace, on obtient la valeur de seuil appelée par LAPICQUE : rhéobase. Le temps minimum que doit durer un courant pour obtenir une excitation avec le voltage de la rhéobase est le temps utile.

Il existe pour chaque voltage une durée utile au-dessous de laquelle il est inutile de prolonger le passage du courant. LAPICQUE a proposé d'utiliser un voltage double de celui de la rhéobase et de déterminer le temps nécessaire avec cette intensité pour obtenir une réponse.

Ce temps caractérise la chronaxie. "Celle-ci est le temps de passage d'un courant nécessaire à l'obtention d'une réponse minimale avec une intensité double de celle de la rhéobase". Un tissu est ainsi caractérisé par sa chronaxie, sa baisse signifiant une augmentation de l'excitabilité.

1.4233 - Les lois d'excitabilité

a) Loi de sommation ou d'addition latente

Des excitations d'intensité subliminaire, incapables par conséquent de déclencher une réponse, deviennent efficaces si elles sont répétées avec une fréquence convenable et pendant un certain temps. Tout se passe comme si les stimulations successives s'étaient additionnées et avaient obtenu une sommation de leurs effets. Si la durée de passage reste constante, et si la fréquence diminue, pour obtenir la sommation, on doit augmenter le voltage.

Si au contraire la fréquence augmente au-delà d'une certaine limite, le voltage ne peut être diminué. De nombreux tissus en particulier les muscles lisses, sont peu sensibles à une excitation isolée. Pour obtenir une réponse, il faut des excitations répétées de façon plus ou moins rapide et prolongée. LAPICQUE a appelé "excitabilité itérative", ce type d'excitabilité.

b) Loi de la période réfractaire

L'excitabilité disparait immédiatement après la réponse à une excitation pendant le temps que nous avons déjà vu et appelé : période réfractaire absolue.

A cette période succède une autre pendant laquelle une réponse n'est obtenue qu'avec des stimuli supérieurs à l'intensité initiale : c'est la période réfractaire relative. Puis avant d'atteindre le seuil normal, on passe souvent par une phase d'hyperexcitabilité. Il faut souligner que la période réfractaire augmenterait si les stimuli se répétaient à des fréquences telles que la récupération complète du tissu ne puisse être obtenue dans l'intervalle. Si celui-ci est augmenté, l'élément excité a le temps de récupérer son excitabilité et peut à nouveau répondre.

c) Loi du tout ou rien

Dès que le seuil d'excitation est atteint, soit d'emblée, soit par sommation, la réponse cellulaire est immédiatement maximale. C'est ce qui fait dire à M. BOWDICHT que la matière vivante répond par "tout ou rien". Cela est dû à l'existence du seuil et à la période réfractaire.

d) Loi de polarisation

Le passage d'un courant dans un tissu, en dehors des phases variables d'ouverture et de fermeture modifie l'excitabilité pendant la phase constante. Il augmente la polarisation dans la région de l'anode et la diminue dans la zone de la cathode.

1.4234 - Remarques

En résumé pour exciter un neurone, il faut un stimulus qui possède des caractéristiques précises (intensité, durée, niveau, vitesse) et sa réponse se fait suivant une loi du tout ou rien.

D'autre part, des stimuli successifs inférieurs au seuil peuvent s'additionner suivant la loi dite "d'addition latente" pour déclencher une réponse ou au contraire une inhibition pour les stimuli suivants, selon leur fréquence.

Il faut signaler maintenant l'oeuvre intéressante de WIENER qui a montré que la notion de variable importante à rechercher dans un cerveau n'était pas l'énergie qu'il consomme, transforme ou libère, mais la somme et le type d'ordres qu'il peut exécuter par l'activité des neurones composant ses éléments. Il s'agit essentiellement d'un problème d'entropie négative.

Dans tout ce qui précède, on a pu remarquer l'analogie surprenante qui existe entre un neurone et un élément de logique câblée. Cela étant admis, moyennant bien sûr de nombreuses restrictions, il paraît tout à fait normal qu'on ait essayé de simuler la cellule de base du cerveau avec des moyens électronique, électrique ou électro-chimique.

## *1.43 - Les modèles de simulation du neurone et des réseaux nerveux*

1.431 - Modèle de neurone plastique avec circuit réverbérant électro-chimique (voir fig. 1431 a)

Cette cellule électrolytique de la BISSET BERMAN CORP, dans sa version tripolaire, semble donner une bonne interprétation du neurone.

Cette cellule possède une impédance qui varie brusquement lorsqu'un courant électrique a transporté tous les ions sur une seule électrode. Un dispositif polarisant ramène les ions à leur origine en l'absence d'excitation de la cellule. Il faudrait selon les cas une quantité plus ou moins grande de courant, c'est-à-dire une excitation en parallèle par un plus ou moins grand nombre d'afférences pour obtenir une réponse.

1.432 - Modèle de simulation électronique du neurone et de certaines propriétés des réseaux nerveux

(Ecole Nationale Supérieure d'Electronique et d'Electricité de GRENOBLE d'après une communication au congrès cybernétique 1970 de NAMUR).

La méthode a consisté à élaborer un modèle électronique du neurone et de la synapse et à établir la fonction de transfert de l'ensemble. A partir de ces "cellules", une tentative de simulation de réseaux nerveux a été esquissée, ce qui a rendu possible l'étude de l'influence des divers paramètres du neurone sur le comportement de ces réseaux.

La réalisation consiste à décrire plusieurs systèmes de "Mémoires Actives" et ensuite, des réseaux de voies d'informations parallèles couplées. Par cette maquette, il est démontré que le comportement d'un réseau est une propriété fondamentale de sa structure et que les fonctions de transfert de ses éléments n'ont pour effet que de préciser des caractères secondaires.

1.433 - Les études de M. Jean-Claude LEVY (1) et de l'équipe du C.E.R.A.(2)

A) Généralités

Nous avons vu que le développement de l'intelligence artificielle s'est fait suivant un certain nombre d'axes de percée. Ceux-ci correspondent aux grandes divisions que les auteurs adoptent en général pour présenter leur domaine : l'apprentissage, la reconnaissance des formes, la démonstration des théorèmes, l'heuristique, les modèles. On y ajoute de plus en plus souvent l'étude des langages, naturels ou libres de contexte dont font partie la traduction et la documentation automatiques.

Il existe un consensus sur ces grandes divisions qui se retrouvent plus ou moins chez PITRAT, MINSKI, FEIGENBAUM et FELDMAN, SOLOMONOFF.

L'équipe du C.E.R.A. au contraire s'est orienté dans une direction nouvelle grâce aux recherches effectuées par M. LEVY, qui ont donné lieu aux publications suivantes :

1) étude statistique des réseaux nerveux : circuits à majorité relative (rapport d'étude D.R.M.E. n° 63-34-145) ;

2) modèle de réseau figurant le système nerveux (l'onde électrique - Avril 1963) ;

3) étude de neurocybernétique (rapport D.R.M.E. 34-145 - Novembre 1964) ;

4) S.A.R.F. : "système auto-adaptatif de reconnaissance des formes dynamiques" (rapport d'études D.R.M.E. - Juillet 1967) ;

5) "système nerveux de reconnaissance des formes" (L'onde électrique - Février 1966).

A partir des études 1) et 3) notamment, l'équipe du C.E.R.A. a d'abord étudié les réseaux composés d'un grand nombre de "cellules booléennes" en liaison avec les idées exposées par Mrs SHANNON C. et Mc CARTHY Eds. dans "Automata Studies" (Princeton Unic. Press 1956).

(1) Ingénieur en Chef de l'Artillerie Navale
(2) Centre d'Etudes et de Recherches en automatisme

Au terme de ces recherches, cette équipe a pu mettre en évidence le fait que chaque grand réseau était remplaçable (moyennant certaines hypothèses) par un élément logique non plus booléen, mais à fonctionnement continu appelé "macro-cellule". Les cellules ainsi définies sont conçues pour être assemblées selon des patterns à définir.

Une mémoire (S.A.R.F.) est ainsi constituée par apprentissage et peut traiter des problèmes de reconnaissance des formes séquentielles : problème qui a été fort peu abordé jusqu'à maintenant.

B) S.A.R.F. : la structuration par apprentissage d'une mémoire à associations sémantiques.

La structure S.A.R.F. (lorsque son apprentissage est terminé) est la cellule d'un ensemble de macro-cellules reliées entre elles par des liaisons intercellulaires.

Dans le fonctionnement, il faut distinguer trois stades :

- l'apprentissage qui se fait suivant une méthode structurationniste (apprentissage sans professeur) par fabrication d'un modèle de l'environnement qui est pris en compte à deux niveaux (primaire et secondaire)

  Notons qu'au cours de l'apprentissage, s'introduisent des liaisons parasites (liaisons qui ne correspondent pas à des relations matérielles entre signaux extérieurs et qui gênent les performances logiques de la machine. On retrouvera un phénomène analogue avec les "vecteurs parasites" dans les structures "Mémoires Actives" (voir § 2.34).

- la reconnaissance qui se fait également à deux niveaux (primaire et secondaire) ;

- la restitution, qui est une phase fondamentale pour s'assurer que le système s'est structuré.

C) Conclusion

Du point de vue performances en traitement de l'information ces systèmes S.A.R.F. ont l'avantage de matérialiser le principe des mémoires à accès par le contenu. Si on cherche en effet dans une vaste mémoire de ce type, la ville de FRANCE qui possède à la fois un lac, un duc et un casino, on obtient la réponse (ENGHIEN) en une seule opération (au lieu d'examiner toutes les villes de FRANCE). Il y a donc l'idée d'examen en parallèle (hypothèse H2).

Dans un autre domaine, S.A.R.F. peut reconnaître des signaux entachés d'erreurs ou des signaux présentés avec des échelles de temps variables. Ces deux caractéristiques réunies en font un système original de reconnaissance des formes séquentielles et permet d'en envisager de nombreuses applications, notamment à la reconnaissance du langage parlé.

Du point de vue de la simulation des fonctions cérébrales qui constitue l'autre approche, il n'est pas indifférent de savoir si les mécanismes "actifs" (analyse syntaxique, formation de liaisons d'inhibition spécifique) qui apparaissent nécessaires, devront être imposés par structure au système ou bien s'ils pourront être appris par le système.

D'autre part, S.A.R.F. peut être considéré comme un système à acquisition de connaissances. Des études plus poussées dans cette direction pourront servir à améliorer l'enseignement à des humains dans la mesure où S.A.R.F. peut être considéré comme simulant les phénomènes cérébraux qui se produisent au cours de l'apprentissage.

## 1.44 - *Performances neurophysiologiques susceptibles d'orienter la conception de structures de machines*

### 1.441 - Architecture générale

#### 1.4411 - Introduction

Les études physiologiques montrent que le système nerveux permet à l'individu de répondre de façon coordonnée aux changements qui surviennent dans son environnement. Grâce à son couplage avec le système musculaire, il lui permet aussi d'échapper à cet environnement ou de le transformer au mieux en vue de sa survie. Les notions de couplage et de régulation semblent donc fondamentales. Or la réalisation du couplage avec l'environnement et l'analyse des composantes de cet environnement se font dans différents organes que nous allons citer très schématiquement.

#### 1.4412 - Architecture (Voir fig. 1441 a)

Les points de vue des physiologues convergent en disant que le système nerveux se divise fondamentalement en trois parties : le système afférent, le système efférent, les centres.

a) le système afférent : est en connexion avec les récepteurs sensitifs et conduit les influx d'origine viscérale et musculaire aux centres nerveux.

b) les centres reçoivent ces influx qui, pour certains d'entre eux, entrent dans le champ de conscience. Toute la connaissance du monde qui nous entoure dépend et se limite à ces influx. Mais de nombreux influx inconscients participent aussi à l'équilibre intérieur aussi bien qu'au comportement.

c) le système efférent conduit les influx des centres vers les organes "effecteurs", c'est-à-dire au sens cybernétique du terme vers les organes capables d'action. Ces influx sont donc transformés en actions, réponses appropriées à la situation particulière indiquée par le stimulus afférent.

Signalons que le processus de régulation mis en évidence par LORENTE DE NO est réalisé par des montages en rétroactions des connexions nerveuses, analogues à des "feed back" mécaniques ou électriques.

Cette architecture grossière est fondamentale car elle permet de réaliser les fonctions de couplage et de régulation, fonctions de base qui peuvent être retenues dans la conception de toute machine.

Ces caractéristiques correspondent assez parfaitement à celles qui se rencontrent dans les éléments logiques électroniques. Il paraît donc assez séduisant d'essayer de reproduire des fonctionnements neurophysiologiques sur des modèles physiques rendus matériellement possibles grâce à l'électronique. C'est pourquoi il nous avait semblé intéressant, pour comprendre le cheminement de la pensée de l'école de la simulation de l'intelligence, de rapporter ici quelques modèles de simulation du neurone.

## 1.442 - Caractéristiques fondamentales des systèmes neurophysiologiques

### 1.4421 - Avant propos

Les considérations précédentes sur le neurone, le système nerveux et les modèles de simulation nous permettent de dégager un certain nombre de principes généraux qui ne sont évidemment pas tous vérifiés. En effet, la connaissance de l'homme sur lui-même notamment sur l'organe qui fait sa supériorité par rapport à l'animal est encore très limitée.

Devant cette inconnue, on a cependant le droit d'émettre des hypothèses sur certains mécanismes (notamment sur celui de l'élaboration de l'acte intelligent), d'essayer de construire de nouvelles machines prenant en compte ces hypothèses et de voir dans quelle mesure ces structures nouvelles peuvent nous apporter des enseignements :

- d'une part sur la connaissance véritable de ce que l'on cherche. Les hypothèses peuvent se vérifier ou non ;
- d'autre part dans la résolution de certains types de problèmes mal traités par les procédés classiques. (Je pense particulièrement aux problèmes hautement combinatoires).

### 1.4422 - Première caractéristique

Il semble que les systèmes neurophysiologiques ne prennent pas en compte directement l'ensemble des informations fournies par leurs percepteurs, ce qui formerait un espace pluridimensionnel. Au contraire ces informations seraient saisies deux par deux (ou peut-être trois par trois, ou plus), ce qui reviendrait à considérer seulement les projections de ces informations (ou situations) dans des espaces multidimensionnels. Toutes les situations seraient confrontées deux à deux dans ce que les physiologues appellent les aires d'associations.

Justification :

Dès que l'on évoque un cas concret de comportement, le nombre de combinaisons et par conséquent le nombre d'actes liés aux différents états des percepteurs devient rapidement gigantesque. Pour un comportement moyennement complexe, mettant en jeu 300 situations, il faudrait près de $10^{500}$ éléments pour mémoriser ces permutations (300 !) correspondant à un état seulement de chacune des 300 situations. Or le cerveau humain ne possède que $10^{10}$ à $10^{20}$ neurones. Ainsi, il est très loin de pouvoir représenter un tel réseau s'il est unique et monolithique.

Pour éviter ce processus combinatoire, la prise en compte des informations semblerait se faire de la manière suivante :

- un acte étant la recombinaison de trois informations (situation de départ SD, situation d'arrivée SA et action qui fait passer de SA à SD), il se traduit par un espace tridimensionnel. En substituant à l'action, car il peut y avoir plusieurs actions réalisant la même transformation, la variation entre la situation de départ et la situation résultante, le problème se ramène à un espace bidimensionnel suffisant pour décrire un acte. Cet acte élémentaire dans l'espace bidimensionnel est en fait la projection sur cet espace d'un acte complexe pris dans un espace pluridimensionnel. Ainsi, il semblerait qu'en phvsiologie, la décomposition d'un espace pluridimensionnel en sous-espaces bidimensionnels se fasse naturellement.

Cela nous permet d'énoncer l'hypothèse H1 :

"Les systèmes neurophysiologiques prendraient en compte les informations par projection dans des sous-espaces bidimensionnels".

En reprenant l'exemple d'un comportement à 300 situations, il faudra $C_{300}^{2}$ espaces bidimensionnels pour prendre en compte ces situations soit environ $4.10^{4}$ espaces bidimensionnels. Si on considère que chacune des 300 situations doit passer par 30 valeurs intermédiaires (ou états) avant que le comportement soit complètement défini, il en résulte que chaque plan devra comprendre 30 x 30, soit 900 éléments pour mémoriser l'évolution simultanée de deux situations. Pour absorber l'ensemble des 300 situations suivant le principe des projections, il faudra donc :

$900 \times 4 \times 10^{4}$, soit $3,6 . 10^{7}$ éléments,

chiffre inférieur au nombre de neurones du cerveau. On peut donc penser que de cette manière le comportement moyennement complexe précédent puisse être très facilement pris en compte par le cerveau humain.

1.4423 - Deuxième caractéristique

a) Généralités

Dans les systèmes neurophysiologiques, la prise en compte des informations dans chaque sous-espace bidimensionnel ne se ferait pas en séquentiel mais en parallèle. D'autre part l'analvse des différents sous-espaces bidimensionnels serait simultanée.

b) Justification

Si nous comparons l'extrême puissance combinatoire du cerveau à la lenteur relative du cheminement ionique et chimique des messages entre neurones (nous avons vu que les vésicules synaptiques mettaient 0,5 ms environ pour passer d'un neurone à l'autre, ce qui est énorme comparativement aux circuits électroniques actuels qui peuvent changer d'état en quelques ns), il semble très probable que le système nerveux n'exploite pas les informations en séquentiel mais en parallèle.

En reprenant l'exemple précédent, dans chaque espace bidimensionnel, il faudrait malgré tout $2^{30}$ combinaisons deux à deux pour envisager toutes les situations intermédiaires possibles. Comme on a vu que le délai synaptique était d'environ 0,5 ms, si ces combinaisons s'effectuaient les unes après les autres (C'est-à-dire séquentiellement), il faudrait $0,5 \times 2^{30}$ ms soit $0,5\ 10^{6}$ secondes, ce qui représenterait environ 130 h soit plus de 5 jours.

Cela signifie que devant une situation moyennement complexe, il faudrait 5 jours de travail intense à notre cerveau pour qu'il nous autorise à prendre une décision. Or suivant un processus d'exploration parallèle, il n'y aurait que 30 états sucessifs au maximum à considérer en série, ce qui donnerait 0,5 x 30 ms, durée certainement beaucoup plus réaliste.

En conséquence, il y aurait à chaque instant une participation globale de l'ensemble du réseau à la solution du problème posé, puisque les divers sous-espaces bidimensionnels peuvent être explorés simultanément. Ainsi le parallélisme serait total, ce mécanisme étant alors assez différent des techniques calculateurs dites "parallèles", où en fait ce sont différents petits ordinateurs qui travaillent simultanément à des sous- problèmes distincts.

A ce sujet, Claude BERNARD disait que le fonctionnement du tout n'était pas la somme du fonctionnement des parties. Inversement, on peut penser que le fonctionnement cérébral, l'idéation, phénomène strictement séquentiel, s'exprimant par une suite d'actions ou de phrases, n'est pas l'image du mécanisme cérébral dont elle est issue. On peut en déduire que dans le cerveau, la manipulation des informations se fait "en parallèle" et d'une manière inaccessible à notre logique séquentielle.

Il est possible d'imaginer ce processus comme une combinaison d'intersections des sous-ensembles bidimensionnels. Comme nous l'avons vu, cela permettrait de comprendre l'extrême rapidité du cerveau à décider dans des situations d'une telle complexité qu'aucun ordinateur ne peut les aborder, alors que les transmissions d'informations se font des milliers de fois moins vite dans le cerveau.

c) Enoncé de l'hypothèse H2

L'exploitation des informations par les systèmes neurophysiologiques se fait suivant un processus de parallélisme total.

1.4424 - Troisième caractéristique

Les systèmes neurophysiologiques gèrent en permanence afin de les composer, les actions élémentaires envisagées dans chaque sous-espace bidimensionnel, dans des centres coordinateurs et associatifs.

Il est en effet indispensable d'assurer une recombinaison des diverses actions entreprises dans les espaces bidimensionnels. Imaginer pourrait en effet se définir comme la possibilité d'associer de façon originale des éléments mémorisés, de reconstituer de nouveaux assemblages au sens du Professeur KAUFMANN.

Ainsi l'architecture nerveuse du cortex a pu le faire considérer essentiellement comme un organe d'association et de recombinaison.

Enoncé de l'hypothèse H3

Les systèmes neurophysiologiques combinent les diverses actions élémentaires élaborées dans les sous-espaces de projection.

1.4425 - Quatrième caractéristique

Entre les systèmes neurophysiologiques et le milieu extérieur, il se forme un couplage permanent qui permet aux systèmes de réagir à chaque modification du milieu. Grâce à ce couplage par l'intermédiaire du système musculaire, l'individu peut soit échapper à l'environnement, soit le modifier au mieux, en vue de sa survie. Il a donc une adaptation continue du système à l'environnement.

Enoncé de l'hypothèse H4

Les systèmes neurophysiologiques s'adaptent aux variations du milieu, qu'elles soient cycliques, ou au contraire accidentelles, donc imprévisibles.

1.4426 - Cinquième caractéristique

Des expériences montrent que notre cerveau n'a pas un comportement complètement déterminé. Disposant d'un même système de données, nous ne donnons pas obligatoirement les mêmes réponses à des dates différentes. En général nos réponses s'affinent avec l'expérience. Tel problème qu'on ne savait pas résoudre à 10 ans, devient évident à 14 ans car entre temps, nous avons acquis et mémorisé certaines structures mentales qui nous permettent d'élaborer plus facilement une solution. L'apprentissage est donc une composante fondamentale de notre évolution. Nos performances s'améliorent au fur et à mesure que l'on acquiert de l'expérience, tout au moins dans certains domaines.

En effet dans le processus de l'apprentissage, il convient de faire abstraction du "vieillissement biologique" qui tend au contraire à ralentir nos mécanismes intellectuels. Avec le temps, nos performances sont de moins en moins bonnes. Ce phénomène s'expliquerait d'ailleurs par la destruction progressive d'un certain pourcentage de neurones avec le temps. Notre cerveau disposerait de moins en moins de cellules vivantes, ce qui limiterait de plus en plus sa capacité de "traitement".

Il existerait donc un compromis entre l'amélioration de nos performances avec le temps grâce à l'expérience et leur réduction avec le vieillissement biologique, d'où une certaine tranche d'âge ni trop jeune ni trop vieille, où nous atteindrions notre "rendement intellectuel" maximum.

Enoncé de l'hypothèse H5

Les systèmes neurophysiologiques sont doués d'une fonction d'apprentissage, car leurs performances s'améliorent au fur et à mesure qu'ils acquièrent de l'expérience.

1.4427 - Caractéristiques complémentaires

1.44271 - Introduction

Nous avons dégagé jusqu'à présent un certain nombre d'hypothèses qui nous serviront à concevoir le combinateur électronique S.N.C.F. (objet du livre II). Cependant d'autres hypothèses peuvent encore être mises en relief dans les systèmes neurophysiologiques et être plus ou moins complétement prises en compte par des machines.

C'est pourquoi nous avons voulu les séparer des autres car elles ne se vérifieront que sur certaines structures seulement. Précisons tout de suite qu'elles ne seront pas intégrées dans le combinateur expérimental S.N.C.F.

1.44272 - Caractéristique d'imagination

Selon Claude BERNARD, tout dans le fonctionnement cérébral laisse supposer un processus d'imagination. En effet il se peut qu'il y ait des combinaisons d'informations relatives à des phénomènes différents. On peut dire dans ce cas que le cerveau imagine par exemple une situation intermédiaire et un moyen fictif pour résoudre le problème.

Enoncé de l'hypothèse H6

Les systèmes neurophysiologiques peuvent imaginer des situations intermédiaires considérées comme support de transition dans l'élaboration d'un comportement.

1.44273 - Caractéristique d'abstraction

Dans certains cas, il semble que le cerveau envisage une possibilité de solution à un problème qui n'en a pas en supprimant certaines "contraintes" entre les données, ou certaines corrélations avec plusieurs autres variables. Il procèderait par abstraction de certains paramètres faisant partie de l'énoncé d'un problème.

Le Docteur SAUVAN donne fréquemment l'image suivante : "On entre dans une pièce et l'on désire s'asseoir dans un fauteuil Louis XV. S'il n'y a qu'une chaise de ce style, il n'existe pas de solution à notre problème. Par contre, il est possible d'en envisager une, en faisant abstraction de la signification" fauteuil". A partir de ce moment-là, on peut imaginer aisément qu'il faille faire abstraction du style, puis de la présence d'un siège (ce qui peut conduire à s'asseoir sur un lit, ou un autre meuble).

Enoncé de l'hypothèse H7

Devant des problèmes sans solution, les systèmes neurophysiologiques procèdent par abstraction de certaines données de l'énoncé pour élaborer malgré tout une solution.

1.44274 - Caractéristique de généralisation

Claude BERNARD estime aussi qu'il est possible de penser que le cerveau "généralise" à d'autres situations des expériences acquises dans certaines conditions.

Ce serait en quelque sorte une extrapolation de la fonction d'apprentissage précédemment définie. Ce mécanisme permettrait de trouver également des solutions à des problèmes apparemment insolubles.

Enoncé de l'hypothèse H8

Les systèmes neurophysiologiques peuvent généraliser à certaines classes de problèmes l'expérience acquise sur d'autres classes distinctes des premières.

1.44275 - Caractéristique du "Recours au hasard"

Enfin lorsque toutes les tentatives d'imagination, d'abstraction et de généralisation ont échoué, on peut penser que le cerveau se permet d'élaborer malgré tout une partie de la solution en ayant recours au hasard. Cela se produit chaque fois que nous sommes impuissants à prendre une décision réfléchie, mais que néanmoins nous sommes contraints d'en prendre une quelqu'elle soit.

L'illustration de ce mécanisme serait liée à la notion "d'urgence biologique". Très souvent l'homme se trouve dans des situations où il est nécessaire d'agir pour survivre, sans pouvoir étudier la justification logique de ses actes.

Il n'en reste pas moins vrai qu'un comportement intelligent peut être engagé dès que le "pas délicat" est franchi.

Enoncé de l'hypothèse H9

Devant un problème urgent sans solution apparente, les systèmes neurophysiologiques peuvent avoir recours à une recherche au hasard pour élaborer malgré tout une solution.

1.443 - Quintuplet d'hypothèses de base

1.4431 - Enoncé du "quintuplet d'hypothèses de base"

De ce système de cinq hypothèses, découlent toutes les considérations qui vont suivre et qui nous permettront de définir une machine dont la structure reposera sur elles.

Dans un but pédagogique, nous nous permettons de les rappeler :

Hypothèse de projection H1

Les systèmes neurophysiologiques prennent en compte les informations par projection dans des sous-espaces bidimensionnels.

Hypothèse de parallélisme H2

L'exploitation des informations par les systèmes neurophysiologiques se fait suivant un processus de parallélisme total.

Hypothèse de recombinaison H3

Les systèmes neurophysiologiques combinent les diverses actions élémentaires élaborées dans les sous-espaces de projection.

Hypothèse d'adaptation H4

Les systèmes neurophysiologiques s'adaptent aux variations du milieu qu'elles soient cycliques, ou au contraire accidentelles donc imprévisibles.

Hypothèses d'apprentissage H5

Les systèmes neurophysiologiques sont doués d'apprentissage, car leurs performances s'améliorent au fur et à mesure qu'ils acquièrent l'expérience.

1.4432 - Enoncé du "quadruplet d'hypothèses complémentaires"

Hypothèse d'imagination H6

Les systèmes neurophysiologiques peuvent imaginer des situations intermédiaires considérées comme support de transition dans l'élaboration d'un comportement.

Hypothèse d'abstraction H7

Devant des problèmes sans solution, les systèmes neurophysiologiques procèdent par abstraction de certaines données de l'énoncé pour élaborer malgré tout une solution.

Hypothèse de généralisation H8

Les systèmes neurophysiologiques peuvent généraliser à certaines classes de problèmes l'expérience acquise sur d'autres classes, distinctes des premières.

Hypothèse du recours au hasard H9

Devant un problème urgent, sans solution apparente, les systèmes neurophysiologiques peuvent avoir recours à une recherche au hasard pour élaborer malgré tout une solution.

## *1.45 - Exemples de machines de simulation de comportement*

### 1.451 - Simulation du comportement instinctif

#### 1.4511 - Tortues de GREY WALTER

##### 1.45111 - Principe

C'est un appareil à trois roues actionnées par des moteurs électriques alimentés par accumulateurs. Elle est surmontée d'une cellule photo-électrique qui commande par relais les moteurs de manière à diriger l'automate vers la lumière. De plus la tortue est douée de "tactisme" ! Quand la carapace heurte un obstacle, un circuit se ferme, qui neutralise le "phototropisme" et libère un instant la roue directrice. L'appareil semble alors tâtonner, en festonnant autour de l'obstacle, avant de reprendre sa route vers la lumière. La cellule photo-électrique étant sensible à l'intensité de la lumière, il en résulte des comportements de la tortue différents selon les valeurs de ces intensités lumineuses. Par exemple si la source est trop intense, elle agit comme un obstacle et la tortue la contourne. Mais si par contre l'accumulateur est déchargé, la lumière intense ne provoque plus "l'effet obstacle" précédent et la tortue se dirige vers elle.

Si une lumière intense surmonte l'appareil de recharge de sa batterie, la tortue semble aller chercher "la nourriture électrique" jusqu'à ce que la cellule photo-électrique puisse agir de nouveau pour l'éloigner de la lumière vive. L'automate semble donc imiter, aussi bien la sensibilité interne que la sensibilité externe des êtres vivants. Il y a une simulation de ce que TOLMAN appelle la "demande variable" psycho-organique dont l'exemple le plus courant est celui de la faim.

##### 1.45112 - Remarques

Malgré des caractères très spectaculaires, les "animaux" de GREY WALTER sont des appareils assez grossiers. Bien que ces machines semblent "voir" les obstacles, en fait elles ne les perçoivent pas. Elles ne reconnaissent pas les formes comme telles, puisqu'elles se bornent à en suivre le contour de proche en proche.

Certains auteurs prétendent même qu'ALMER et ELSIE (noms des tortues) sont plus ou moins anthropomorphes et singent le mécanisme extérieur des êtres animés au détriment d'ailleurs de performances intelligentes.

En effet ces automates de la cybernétique n'avant pas de motivation ne sont pas des êtres. Les automates de GREY WALTER sont de purs lieux de passage du stimulus à la réponse, alors que les êtres réels vont à leur but à travers les obstacles. Ces automates à vrai dire, fonctionnent selon une volonté encadrante, celle de leur constructeur. Ils sont des machines auxiliaires pour le constructeur comme toutes les machines construites par l'homme, et il peut être dangereux de se servir de l'auxiliaire comme d'un modèle pour comprendre l'être autonome.

### 1.4512 - L'homéostat du Docteur ROSS ASHBY

#### 1.45121 - Aperçu sur le fonctionnement

L'homéostat du Dr ASHBY est un appareil constitué par quatre éléments identiques dont chacun réagit sur les trois autres. Un élément comporte en particulier un galvanomètre à cadre mobile et aimant dont le cadre commande la plongée d'un fil métallique dans un bac conducteur à gradient de potentiel. Chaque galvanomètre reçoit le courant de sortie de tous les autres et l'équilibre de chacun est ainsi fonction de l'équilibre de l'ensemble.

Si on perturbe un de ses éléments en bloquant par exemple l'aiguille de son galvanomètre, le reste de l'homéostat s'adapte à cette nouvelle situation, cherche et trouve le moyen d'atteindre la position d'équilibre prescrite. De plus les courants de sortie, avant d'arriver au voisinage d'un élément, passent par des sélecteurs qui représentent eux-mêmes des feed back, montés selon des fonctions en gradins, et qui modifient brusquement le feed back principal quand, par suite d'un obstacle mécanique introduit par l'expérimentateur, il tendrait à prendre une position extrême au lieu de chercher l'équilibre optimal. Le sélecteur recherche les feed back secondaires qui conviennent pour que le feed back principal puisse accomplir sa mission et que l'appareil soit de nouveau en mesure de chercher et d'atteindre l'équilibre prescrit.

Cet appareil ainsi conçu est capable de comportements assez remarquables : par exemple si l'on inverse les conducteurs d'un des feed back de manière à permuter sa polarité, ce qui revient à détruire le système auto-régulateur, alors le sélecteur intervient pour chercher les feed back qui corrigeront, ou mettront hors circuit le feed back inversé et feront ainsi retrouver l'équilibre.

Si on solidarise les aiguilles de deux galvanomètres par une tige rigide, l'appareil est de même capable de retrouver l'équilibre stable, au point que si l'on enlève la tige solidarisante, l'appareil doit à nouveau tâtonner pour retrouver le précédent montage, un peu à la manière d'un homme guéri, mais désorienté parce qu'il s'était habitué à sa maladie.

#### 1.45122 - Discussion

Certes pour l'instant ce type d'automate ne remplit pas de fonctions utilitaristes. Mais il a le mérite important de montrer qu'une régulation peut se faire par un changement automatique de feed back sans faire appel à un centre supérieur de nature corticale.

Aussi cette expérience montre la possibilité de construire des automates sur-composés dont l'homéostat ne représenterait qu'une partie, équivalente au cortex "spéculant", l'autre partie utilisant ensuite les résultats essayés sur l'homéostat.

ASHBY peut considérer avec raison que son appareil est analogue au couple formé par le cerveau et le milieu, le cerveau devant s'adapter aux variations accidentelles et imprévisibles du milieu. On peut ainsi considérer l'automate comme capable de chercher une balance des intérêts. Il pourrait calculer son comportement selon les principes de la théorie marginaliste.

Cette idée fondamentale de l'adaptation a été prise en compte pour formuler notre hypothèse n° 4 sur les systèmes neurophysiologiques.

## 1.452 - Instruments du comportement intelligent

### 1.4521 - Le perceptron de ROSENBLATT

#### 1.45211 - Introduction

Le perceptron apparaît comme un outil important de reconnaissance des formes, car il aurait la propriété d'appauvrir l'espace pour n'en conserver que les composantes principales. Cette machine est intéressante en tant que machine de laboratoire car elle vérifie certaines lois neurophysiologiques de l'association et de l'apprentissage.

#### 1.45212 - Description schématique - Fonctionnement

Cette machine peut être décomposée en 3 niveaux fonctionnels :

- niveau 1 - Des récepteurs transforment une énergie physique (lumière, son, pression, chaleur) en un signal valant 1, si l'énergie dépasse un certain seuil et 0 dans le cas contraire.
- niveau 2 - Des unités dites "d'associations" (Aj) sont reliées à plusieurs unités dites "sensorielles (Si) (voir fig. 145 a). Elles sont reliées par des connexions Vij excitatrices ou inhibitrices
  - si Vij > 0 = ) connexion excitatrice
  - si Vij < 0 = ) connexion inhibitrice

Oj étant le seuil de l'unité d'association Aj, si :

Vij . Si > Oj le perceptron est dans l'état 1

Vij . Si < Oj le perceptron est dans l'état 0

- niveau 3 - Il est formé d'unités dites de "Réponses" RK (voir fig. 145 b)

Si le perceptron possède N unités de réponse, il pourra donner 2N réponses possibles en associant un nombre binaire de N chiffres à chaque réponse.

Les unités associatives sont des détecteurs de caractéristique. A chaque unité est associée une caractéristique. Si la caractéristique existe, l'unité associative correspondante sera excitée. La nature de la caractéristique dépend des poids des connexions qui relient l'unité associative aux récepteurs.

Si on introduit un apprentissage qui fait varier les poids Wij des connexions entre unité associative et unité de réponse en fonction des résultats du perceptron, cela revient à déplacer les hyperplans qui séparent les diverses classes dans l'espace des caractéristiques. C'est ce que réalise la forme la plus classique des perceptrons. Par contre si l'on pouvait faire varier le poids des connexions entre les deux premiers étages, on aurait la possibilité de changer la nature des caractéristiques.

Signalons enfin qu'il existe des formes complexes de perceptrons dont l'analyse est beaucoup moins simple (plus de trois étages, liaisons entre éléments d'un même étage).

1.45213 - Conclusions

Par ses propriétés d'appauvrissement de l'espace dues aux seuils Oj et Tk qu'il faut franchir pour que le perceptron change d'état, c'est un outil précieux en reconnaissance des formes pour éliminer les impuretés de ligne.

Il s'ensuit qu'un système alimenté par un perceptron a une masse d'informations bien inférieure à manipuler. Mais à défaut de l'hypothèse d'apprentissage est-ce que cet appareil simule vraiment des fonctions supérieures de l'intelligence humaine. Certains pensent que le perceptron ne constituerait qu'un capteur très perfectionné.

Notons cependant qu'il n'est pas impossible que chez l'homme, il y ait plusieurs centaines d'informations différentes élaborées par des récepteurs qui fonctionneraient comme des perceptrons. Dans cette conception, à chaque type de récepteur serait associé un type d'effecteur de manière à constituer la fameuse triade indivisible : situation de départ, action, situation résultante.

1.4522 - Les matrices de STEINBUCH

Ce type de machine se propose de reproduire certaines performances de l'intelligence humaine.

1.45221 - Aspect fonctionnel (voir fig. 145 a)

Une matrice est constituée de colonnes, dont chacune est affectée à la perception d'un message bien défini venant de l'environnement. Chaque ligne correspond à une signification. Chaque état de l'environnement est représenté par un certain nombre de colonnes sous tension. Les autres colonnes restent neutres. On donne une signification à cet environnement en mettant sous tension une des lignes. Le point de croisement de chaque ligne avec chaque colonne est fait d'un élément qui se mémorise en devenant conducteur. Au bout d'un certain nombre d'expériences, plusieurs points de croisements se trouvent mémorisés. Lorsque plusieurs expériences légèrement différentes ont reçu la même signification, les mémorisations sur la ligne correspondante se trouvent en nombre supérieur à celui des messages de l'expérience la plus complète.

1.45222 - Exploitation de la matrice

- Devant une expérience nouvelle des messages engendrés atteignent un grand nombre de lignes, mais il y a une des lignes qui reçoit plus de messages que les autres. Elle définit alors la signification la plus probable que l'on doit donner à ce message nouveau.

- Lorsqu'on veut savoir à quoi correspond réellement une signification, il suffit d'envoyer un signal dans la ligne correspondante, et l'on dispose en tête des colonnes de l'ensemble des caractéristiques appartenant à cette signification.

Il est extrêmement aisé de construire une pyramide de matrices de STEINBUCH de façon à ce que les significations de l'une entrent comme environnement sur les colonnes suivantes. On peut obtenir des "significations de significations".

Quelles fonctions d'intelligence peut-on retrouver dans ces matrices :

- Tout d'abord il est toujours possible d'affecter une signification à un évènement quelconque, même si les caractéristiques de cet évènement sont franchement différentes. Ce serait une fonction essentielle de la pensée, et rattacher un évènement inconnu à un concept apparemment très éloigné peut être considéré comme une manifestation intelligente. Cela vérifierait notre hypothèse de "généralisation".
- Il est possible dans ces matrices de sélectionner pour un même évènement un certain nombre de significations "plus au moins proches" de l'évènement. On se trouve là en présence d'un processus d'association d'idées, ce qui peut correspondre à notre hypothèse H3 de recombinaison.
- En affichant une "signification" sur une ligne, on retrouve sur les colonnes la somme des informations susceptibles d'appartenir à tous les environnements ayant cette signification. On a donc un processus d'imagination car on construit un environnement plus riche que celui dont on était parti.

1.45223 - Remarque

Cependant un problème capital subsiste : il faut commander ces opérations. Les matrices de STEINBUCH sont inertes. Elles ont certes des possibilités d'un ordre supérieur, mais ce ne sont que des possibilités et l'on est en droit de se demander si l'essentiel ne réside pas dans le mécanisme qui va piloter ces matrices.

## 1.453 - Les simulations du comportement intelligent

### 1.4531 - Système auto-adaptatif de reconnaissance des formes dynamiques (S.A.R.F.) de J.C. LEVY

C'est l'appareil envisagé au paragraphe 1.433 et qui peut se classer ici du point de vue simulation des fonctions cérébrales.

### 1.4532 - La "Mémoire Active" du Docteur SAUVAN

Selon son inventeur, cette structure serait essentiellement un simulateur de fonctions intellectuelles. Il la définit comme une "machine informatique" capable, à partir d'expériences antérieures qu'elle a assimilées, d'élaborer un processus d'association de deux états qu'elle connaît, mais qui n'avaient pas nécessairement été rapprochés dans une expérience antérieure".

Nous ne nous attarderons pas davantage ici sur cette nouvelle machine, puisqu'elle fera l'objet des chapitres suivants.

## *1.46 - Conclusions*

Il faut remarquer que toutes les machines précédentes satisfont d'une part à l'un au moins des cinq critères énoncés au § 1.22 et d'autre part à l'une au moins des hypothèses de base du § 1.443.

Il s'ensuit que ces machines ont en commun deux familles de caractéristiques :

- elles relèvent toutes de ce qu'il est convenu d'appeler le domaine de "l'intelligence artificielle" ;

- elles reproduisent toutes certains processus neurophysiologiques en s'appuyant sur une structure en réseau.

Cette notion de réseau est très importante car les comportements intellectuel ou physique se traduisent par une suite d'actes qui peut se représenter comme un cheminement dans un réseau. Les noeuds représenteraient les actes et les branches, les liaisons permanentes marquant l'identité d'une situation résultante avec la situation de départ suivante.

Il est alors pensable d'imaginer une machine dans laquelle chaque acte est représenté par un élément binaire, qui normalement n'est pas passant, mais qui le devient lorsque l'évènement qui provoque cet acte a été enregistré. Ces éléments humains constitueraient les noeuds du réseau. Des liaisons précâblées matérialiseraient les liaisons entre chaque situation résultante et les diverses situations de départ correspondantes. C'est cette démarche qui a été faite dans les structures "Mémoire Active".

*Nota :*

Soulignons que certaines des machines étudiées précédemment peuvent paraître dépassées. Il est certain que si on devait faire de telles études à l'heure actuelle, on ne réaliserait pas la plupart d'entre elles mais on utiliserait les possibilités des ordinateurs pour simuler leur comportement en adoptant des méthodes de programmation évoluées (programmation dynamique ou micro-programmation).

Par exemple au perceptron, peuvent très bien être rattachés maintenant les programmes ADALINE, MADALINE et PANDEMONIUM.

Le comportement intelligent de la machine se situerait alors au niveau du programme. Il n'en reste pas moins vrai que nous resterions d'après notre critère 5 (§ 1.227) dans le domaine de l'intelligence artificielle.

# CHAPITRE 2

## Les structures "Mémoires Actives" du Dr SAUVAN

## 2.1 - GENERALITES

Les études du chapitre précédent ont permis de remarquer la présence des centres en neurophysiologie et de mettre en évidence la possibilité de représenter une image dégénérée de ces centres à l'aide d'une électronique adaptée.

Le Docteur SAUVAN a essayé de concevoir des modèles en logique câblée vérifiant les hypothèses précédentes et reposant sur les considérations suivantes :

1) dans la psychophysiologie, tout semble montrer que l'essentiel de ce qui est mis en mémoire n'est pas la "photographie" d'une situation, mais les circonstances d'une action ;
2) la pensée humaine peut dissocier les composantes d'un événement et en combiner une partie avec certaines composantes d'événements antérieurs ;
3) la pensée humaine peut aussi négliger certaines catégories de composantes de façon à pouvoir corréler certains événements, même s'ils appartiennent à des domaines éloignés les uns des autres ;
4) la pensée humaine semble appréhender globalement ses connaissances et réaliser un tri quasi instantané de celles qui peuvent l'aider à résoudre tel problème à un instant précis ;
5) la pensée semble s'objectiver de deux façons : soit intuitivement,c'est-à-dire en engageant une action sans avoir vérifié logiquement son efficacité ; soit d'une manière "réfléchie", en ayant poussé, préalablement à toute action l'investigation mentale jusqu'à ses limites.

Pour vérifier cet ensemble d'idées, le Docteur SAUVAN s'est efforcé de concevoir un type original de machines (les "Mémoires Actives") en s'affranchissant des modèles existants (les ordinateurs). Selon cet inventeur en effet, l'échec principal des chercheurs en "intelligence artificielle" est dû au fait qu'ils s'efforcent toujours de construire un modèle nouveau qui puisse s'accomoder d'une structure connue.

Or l'ordinateur reposant sur les principes très simples de Turing ou de Moore risquerait de constituer un carcan qui freinerait l'épanouissement d'autres structures reposant sur des principes peut-être aussi simples mais différents.

D'après le Docteur SAUVAN, il semblerait qu'il existe une confusion profonde entre ce qui est du domaine de l'intelligence et ce qui est du domaine du non-résolu par l'homme. Il faut noter d'ailleurs que tous les programmes d'ordinateur se référant à l'intelligence artificielle sont réalisés pour simuler des machines idéales, non construites, ces machines étant conçues elles-mêmes comme des simulateurs du fonctionnement cérébral. L'ordinateur y joue le rôle d'un simulateur de simulateur. Et il est certain que des erreurs extrêmement graves peuvent naître de cet état de fait.

La simulation qui est une ressemblance n'est pas transitive, c'est-à-dire que si A ressemble à B et B à C, cela ne veut pas dire, contrairement à l'axiome dit du Duc de Bordeaux que A ressemble à C.Très souvent l'ordinateur ne peut représenter exactement la machine et le programmeur se contente de considérer celle-ci comme une boîte noire et de simuler simplement son "tableau de vérité". Mais comme la machine n'existe pas, le tableau de vérité n'est déjà pas sûr. En outre, si la machine fonctionne en parallèle, l'ordinateur est obligé de faire une approximation plus ou moins valable.

La machine étant elle-même une copie imparfaite de la fonction intellectuelle, on se demande ce que l'ordinateur peut bien représenter de celle-ci. Aussi pour éviter cet écueil, il fallait concevoir une machine originale ne faisant pas référence à la structure de celui-ci. Ce point de vue justifie en partie les réalisations effectuées en "logique câblée" plutôt que par programmes de simulation. L'autre intérêt du "câblé" réside dans sa capacité de rapidité de traitement.

Conclusion :

En formulant un principe original de machine basé sur les recherches neuro-biologiques actuelles, l'intention pratique du Docteur SAUVAN et de son équipe était de mettre à la disposition de l'homme une sorte "d'intelligence automatique" qui, bien que limitée dans ses "facultés", n'en serait pas moins intéressante pour l'industrie.

## 2.2 - NOTION de MEMOIRE ACTIVE - APERCU HISTORIQUE

### 2.21 - Notion de "Mémoire Active"

Le concept de "Mémoire Active" tel que l'entend le Docteur SAUVAN est fondamentalement différent de l'expression "Mémoire Active" couramment utilisée en électronique par opposition à la notion de "mémoire morte".

Selon lui, sa "mémoire" est dite active parce que les données mises en mémoire au cours d'un problème évoluent pendant son traitement. Ces données sont disponibles à l'instant même où on les utilise. Il n'est pas nécessaire "d'aller les chercher en mémoire" comme c'est le cas pour l'ordinateur. Cette "mémoire" ne fonctionne pas comme un réservoir d'informations figé mais selon un processus de "stockage dynamique". Les informations intéressantes sont conservées alors que celles qui le sont moins sont automatiquement éliminées pour faire place à d'autres informations apparues en cours de travail et qui se révèlent par expérience plus utiles.

Etant donné qu'une structure "Mémoire Active" peut, dans certains modes de fonctionnement, bénéficier de son expérience passée pour trouver des solutions à des problèmes présents, on peut sous cet angle également qualifier d'actif ce perfectionnement avec le temps.

Physiquement le caractère "d'active" donné à cette mémoire se matérialise par le fait que l'opération de mémorisation consiste à rendre passants, c'est-à-dire actifs les éléments binaires représentant les noeuds du réseau maillé. Ainsi cette méthode permet l'évolution (l'activation) des grandeurs physiques prises en compte au cours de chaque opération de mémorisation.

*Remarques :*

Nous avons pu constater que l'expression "Mémoire Active" évoquait souvent des idées étrangères à la structure du Docteur SAUVAN. Même dans certains cas, le terme pourrait prêter à de sérieuses confusions. Pour les éviter, nous avons convenu de noter au cours de cet exposé, l'expression entre guillemets comme suit : "Mémoire Active", chaque fois qu'il s'agissait de la structure ayant fait l'objet de la définition du paragraphe ci-dessus.

En outre, nous aimerions réserver l'emploi de l'expression au principe, à la structure seulement qui peut donner naissance à diverses machines applicables dans des domaines très variés qu'on a tendance cependant à désigner succinctement "Mémoire Active" par extension du terme.

Etant donné que les structures "Mémoires Actives" permettent de résoudre des problèmes de type combinatoire, nous préférons appeler "combinateurs" les machines adaptées à ce genre de problèmes. Ceci justifie l'appellation de "combinateur électronique" que j'ai volontairement utilisée pour désigner la machine faisant l'objet du livre II.

## 2.22 - *Aperçu historique*

Afin de mieux appréhender l'évolution des idées relatives à cette nouvelle structure, je voudrais signaler très rapidement quelques dates qui constituent des points de repère importants.

*1953* Au Congrès International de Philosophie des Sciences de Zurich - présentation d'une communication sur le thème : "Machine de simulation du processus intelligent" (Dr SAUVAN).

*1958* Deuxième Congrès International de Cybernétique de Namur - communication sur : "Système métastable à états stationnaires multiples ; hypothèse épigénétique du comportement instinctif" (Dr SAUVAN).

*1961* Brevet n° 1381.212 - Dispositif à mémoire adaptive et active à capacité illimitée. Ce brevet décrit le modèle cybernétique d'une "Mémoire Active" (Dr SAUVAN).

*1964 (début)* Réalisation de M 1 (appelée aussi Thésée), mémoire active à deux dimensions (Dr SAUVAN et Département Cybernétique de la SNECMA).

*Courant 1964* Etude de "Hermès" : mémoire active à trois dimensions destinée à calculer la trajectoire optimum de bombardiers volant à basse altitude (Dr SAUVAN et SNECMA).

*Fin 1964* Réalisation d'une maquette de circulation urbaine basée sur un principe de "Mémoire Graphe" applicable aux diagrammes pondérés (Dr SAUVAN et SNECMA).

Cette maquette représente 34 segments d'artères et 18 carrefours, permettant de prendre un grand nombre de décisions successives concernant la régulation du trafic routier. Des impulsions circulent de la destination vers l'origine des itinéraires dans un carrefour en vue de rechercher le chemin optimum compte tenu des contraintes physiques (sens unique, sens giratoire, etc.). Signalons que cette réalisation a suscité un grand intérêt parmi le public mais qu'elle n'apporte pas de nouveautés conceptuelles par rapport à M 1.

*1965* Etude de M 2 (appelée aussi Argo), mémoire active à 6 dimensions à but universel (Dr SAUVAN et SNECMA).

*1966* Brevet n° 1.483.778 - Procédé et dispositif de recherche de trajet optimal (Dr SAUVAN, Jacques BERTHELEMY, René BOUE).

1970 Brevet n° 1.586.705 - Procédé et dispositif de recherche simultanée de trajets dans plusieurs réseaux interdépendants et leurs applications aux mémoires actives (Dr SAUVAN et Jacques BERTHELEMY).

1970 Brevet n° 1.586.706 - Mémoire active combinatoire (Dr SAUVAN).

A partir de ces brevets et maquettes, les autres simulateurs d'applications ayant été réalisés, font l'objet du paragraphe 3.6.

## 2.3 - PRINCIPES FONDAMENTAUX d'une STRUCTURE "MEMOIRE ACTIVE"

### 2.31 - Préambule

Compte tenu de certaines hypothèses sur l'élaboration d'un acte intelligent par le cerveau humain, ce type de structure se propose, par une simulation de l'intelligence humaine, de fournir des solutions à des problèmes hautement combinatoires quelle que soit leur nature. Aussi devant la particularité d'une telle étude, est-il nécessaire de préciser la terminologie employée par la suite.

### 2.32 - Terminologie

Un phénomène évolutif dans le temps et dans l'espace peut être décrit par une suite discrète d'états, en général distincts, appelés : situations notées S 1, S 2 ... S i, appartenant à un espace pluridimensionnel (Voir fig. 232a).

Une situation S i résulte de la composition des valeurs de différentes variables (ou axes) de l'espace pluridimensionnel. S i est donc l'extrémité d'un vecteur noté ($\vec{S}$ i) ayant pour composantes les états (S x, S y, S z), des différentes variables mises en jeu. (On considère qu'une variable évolue selon une seule dimension). L'état d'une variable constitue une donnée élémentaire appelée aussi : "élément de situation".

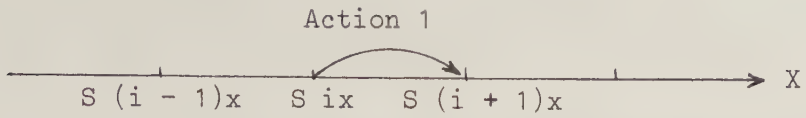
L'enchaînement des vecteurs successifs de situations $\vec{S}$1, $\vec{S}$2 ... $\vec{S}$i est appelé "trajectoire" ou "stratégie". La stratégie est représentative d'un comportement quel qu'il soit : humain, intellectuel, animal, physique, etc. On peut parler du comportement d'une machine qui peut se décrire comme le passage d'un état à un autre par une suite d'opérations ou de transformations . C'est cette suite de transformations élémentaires qui constitue la stratégie.

Pour revenir à des considérations plus mathématiques, la trajectoire sera définie par une ligne brisée appartenant à l'espace pluridimensionnel, qui sera dit "n dimensionnel" si le nombre de variables indépendantes est N (Voir fig. 232b).

Le passage d'une variable x de l'état S ix à l'état S (i + 1) x est réglé par ce qu'il est convenu d'appeler un vecteur élémentaire noté $\vec{i}$ X (i + 1). Le fait d'exécuter cette transition élémentaire sur une variable sera appelé action élémentaire, notée act. Etant donné que les variables changent d'état de façon discrète, si d'autre part la quantification des axes est régulière, on dira qu'une variable :

- "fait une action 1", si elle passe de l'état S ix à l'état S (i + 1) x immédiatement voisin. Notons que dans le cas général d'une variable pourra "faire une action j", si elle passe de l'état S ix à l'état S (i + j) x.

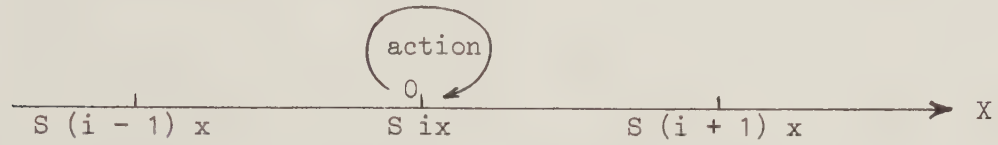
On dira aussi que la variable a progressé de 1.




On convient donc d'adopter le niveau de quantification élémentaire comme unité de base de toute la théorie. Il en résulte que $|\overrightarrow{i\ X\ (i+1)}| = 1$. Remarquons que dans le cas général, une variable peut passer de n'importe quel état i à n'importe quel autre état i + j. En principe, une variable fera une action de module $|\overrightarrow{i\ X\ (i+j)}| > 1$. Nous conviendrons de représenter ce module par un multiple de l'unité de base définie comme précédemment :

$$|\overrightarrow{i\ X\ (i+j)}| = j.1.$$

- "fait une action 0", si la variable est restée dans l'état S ix :




On dit aussi que la variable a "stationné" dans l'état S ix.

On appellera action complexe, la combinaison simultanée de plusieurs actions élémentaires de variables indépendantes. L'action complexe sera souvent appelée "pas". Le pas correspond donc au vecteur dans l'espace "n dimensionnel" qui fait passer de la situation S i à la situation S (i + 1) (S (i + j) dans le cas général). Il sera noté $\overrightarrow{i\ S\ (i+1)}$.

On conviendra d'appeler la situation origine S i du pas : situation de départ noté S D ou situation origine, et la situation S (i + 1) extrémité du vecteur $\overrightarrow{i\ S\ (i+1)}$ : la situation d'arrivée notée S A ou situation but. Cette notion de situation de départ et d'arrivée ne sera pas limitée à définir le pas, mais sera étendue à la trajectoire (qui est un enchaînement de pas). Par exemple, si on considère la trajectoire DTA, le point D serait la situation de départ du phénomène et A la situation d'arrivée.

Chaque pas sera caractérisé par :

- une situation de départ,
- une action complexe,
- une situation résultante pouvant d'ailleurs constituer la situation de départ du pas suivant.

Le pas constitue donc une transformation élémentaire qu'en langage de comportement, on appelle : "acte". Comme on vient de voir qu'une situation résultante d'un acte peut constituer la situation de départ du suivant, l'acte peut constituer une transformation fermée.

Il faut noter aussi qu'une situation est constituée par un certain nombre de données élémentaires pouvant varier en nombre et en nature d'un pas à l'autre. Par exemple dans une succession de réactions chimiques, les données de la première situation de départ sont constituées par les divers ingrédients qui entrent dans la première réaction alors qu'à la seconde, de nouveaux corps ont pu se former ou disparaître si bien que le nombre de données élémentaires disponibles au début de celle-ci est différent de celui du commencement de la première.

Il peut arriver que certains vecteurs élémentaires tels que $\overrightarrow{i\ x\ (i+1)}$ n'existent pas, par suite d'incompatibilités avec un autre vecteur $\overrightarrow{i\ y\ (i+1)}$ par exemple. On dira dans ce cas que le point de coordonnées $x = i + 1$, $y = i + 1$ est interdit ou encore qu'il existe une contrainte en ce point.

Dans le cas général d'un espace "n dimensionnel", une contrainte peut se matérialiser par un hypervolume à n dimensions.

## 2.33 - *Aspect théorique d'une structure "Mémoire Active" idéale* (Voir fig. 2333a)

### 2.331 - Principe

Soit N le nombre maximum de variables susceptibles de définir une situation de départ d'un phénomène. Supposons que chacune puisse prendre n valeurs distinctes, correspondant aux états possibles des variables notées S ix avec i = 1, 2 ... n. Le problème est ainsi quantifié afin de se rapprocher des éléments en "tout ou rien" que semblent former les synapses dans les connexions interneuronales.

Pour préciser le parallélisme avec le cerveau humain, la notion de variable utilisée ici correspondrait à la notion de dimension utilisée en neurophysiologie. Il y a lieu de noter que certains auteurs évaluent à plusieurs centaines le nombre de dimensions pouvant être prises en compte par le cerveau humain. Rappelons qu'au § 1.4422, 300 données (ou variables) avaient été considérées, pour un comportement moyennement complexe.

La situation résultante vers laquelle on veut amener le phénomène est formée en général de M variables résultantes ($M \neq N$, car des variables ont pu apparaître ou disparaître au cours de l'évolution du phénomène : voir l'exemple du § 2.32 sur la succession des réactions chimiques). Chacune des M variables résultantes est elle-même quantifiable en m valeurs possibles (avec en général $n \neq m$).

Enfin l'action complexe entreprise, qui fait passer de la situation de départ à la situation résultante peut comporter P composantes, chacune étant quantifiable en p valeurs. Une image du phénomène peut être donnée par une représentation matricielle :

$[N]$ matrice situation de départ - matrice rectangulaire de dimension N x n.

$[M]$ matrice situation résultante - matrice rectangulaire de dimension M x m.

$[P]$ matrice actions ou matrice de passage rectangulaire de dimension P x p.

Dans le cas général $N \neq n \neq M \neq m \neq P \neq p$. Le phénomène peut se représenter par la notation suivante :

$$[M] \Delta [P] \rightarrow [N]$$ (Voir fig. 2333b)

qui s'énoncerait :

La matrice "situation d'arrivée" $[M]$ est le résultat de l'action de la matrice de passage $[P]$ sur la matrice de départ $[N]$.

Conventions :

$\Delta$ : est le résultat de

$\rightarrow$ : agissant sur.

Les paramètres sont en général tous différents car des composantes d'actions différentes peuvent conduire à une même situation d'arrivée (cas de trajectoires équivalentes). De même à partir d'une situation de départ unique, on peut obtenir des situations d'arrivée multiples si on prend des familles multiples de composantes d'action (Voir fig. 2333a).

Pour décrire complètement le phénomène, il faudrait imaginer une matrice à six dimensions susceptibles de contenir tous les cas possibles c'est-à-dire les combinaisons des six paramètres. Une telle matrice représentant les combinaisons des paramètres de situations de départ, d'actions et de situations résultantes, avec toutes les valeurs d'états posséderait N.n.P.p.M.m. éléments (Voir fig. 2333b).

Une telle conception monolithique conduirait très vite à un nombre d'éléments chiffrés par des puissances de 10 de l'ordre de 20 ou 100. Il serait impossible de songer à une réalisation quelconque. En outre, une telle structure manquerait de la souplesse nécessaire à la manifestation de propriétés intéressantes.

Il est possible de réaliser une économie en éléments de matrice tout en gagnant de la souplesse en appliquant une méthode de décomposition (hypothèse H 1) à cet ensemble E immense de NnPpMm éléments. Celui-ci est scindé en un certain nombre de sous-ensembles Ej disjoints qu'il faudra ensuite corréler (hypothèse de recombinaison H 3) pour reconstituer l'ensemble initial E. A ce niveau, il paraît logique d'affecter chacun de ces sous-ensembles à un paramètre d'entrée c'est-à-dire à faire correspondre un sous-ensemble Ej à une variable j.

2.332 - Relations de base

Etant donné qu'une variable de départ j peut prendre n valeurs, que l'action sur cette variable j peut se faire de p manières distinctes, et que l'on peut être conduit dans m états différents en situation résultante, il en résulte qu'une action partielle de ce genre doit être décrite par une matrice à trois dimensions de n.p.m. éléments, appelée : matrice d'inscription $[M\ I]$.

1 variable appartenant à N { n — P — m

Nombre total de matrices d'inscription $[M\ I]$.

(23321) $\boxed{Nb\ [M\ I] = SUP\ [N, P, M]}$

Par exemple si N < M < P, le nombre maximum de matrices à trois dimensions permettant de décrire complètement le phénomène sera P.

Or pour reconstituer la réalité du phénomène à partir de ces sous-ensembles ou matrices d'inscription [ M I ], il est nécessaire que les valeurs des paramètres de situations de départ et d'arrivée correspondant à 1 pas soient associées entre elles. De même, il faut associer entre elles les P actions partielles correspondantes. Théoriquement, il faudrait associer à chaque pas les paramètres entre eux de toutes les manières possibles (hypothèse de recombinaison), chaque association étant représentée par une matrice dite : matrice d'association.

Les couples de situations de départ et d'arrivée seraient associés entre eux par des matrices dites :

- matrices générales d'association de situation notées [ MGAS ], soit

  L = S U P [ N, M ].

Le nombre total de matrices types [ MGAS ] serait L, chaque matrice assurant une fonction $C_L^K$ dans le dénombrement théorique des formes d'associations qui sont les suivantes :

(23322) $\underbrace{C_L^1 , \quad C_L^2 , \quad D_L^3 \ldots\ldots, \quad C_L^{1-1} , \quad C_L^1}_{L \rightarrow MGAS}$

Les associations entre actions seraient réalisées par des matrices générales d'association d'actions notées [ MGAA ] qui devraient réaliser des fonctions du type $C_p^k$ :

(23323) $\underbrace{C_p 1, \quad C_p 2, \quad C_p 3 \ldots\ldots C_p k, \quad C_p^{p-1}, \quad C_p^P}_{P \rightarrow MGAA}$

La décomposition de l'espace E en sous-espaces E i a permis de remplacer une matrice ayant N.n.P.p.M.m. éléments par :

SUP [ N,P,M ] o matrices [ M I ] + SUP [ N,M ] matrices [ MGAS ] + P matrices [ MGAA ].

2.333 - Constitution générale d'une structure "Mémoire Active"

Les matrices ainsi définies dans le paragraphe précédent peuvent être physiquement représentées par des réseaux câblés de circuits logiques.

A ce moment :

- la matrice [ MI ] deviendra : le centre d'inscription (C.I.)
- la matrice [ MGAS ] deviendra : le centre général d'asociation de situations (C.G.A.S.)
- la matrice [ MGAA ] deviendra : le centre général d'association d'actions (C.G.A.A.).

Ces centres forment les trois principaux organes d'une structure type "Mémoire Active".

Dans l'hypothèse où N = P = M, une structure "Mémoire Active" possède :

- N Centres d'inscription C I (relation 23321)
- I à N Centre Général d'Association de Situations : C.G.A.S. (relation 23322)
- I à N Centre Général d'Association d'Actions : C.G.A.A. (relation 23323).

Dans la pratique d'ailleurs, les combinaisons réelles de paramètres sont en nombre bien inférieur à celui des combinaisons possibles. Cela permet encore de réduire assez sensiblement le nombre d'éléments logiques.

2.334 - Hypothèses simplificatrices de conception

Au § 2.332 nous avons déjà émis l'hypothèse N = P = M. En nous basant sur l'hypothèse H 1 de décomposition de l'espace, nous pouvons considérer les sous-espaces E i les plus simples c'est-à-dire ceux qui associent seulement deux variables indépendantes et négliger les autres types d'associations (3 par 3, 4 par 4, k par k, etc.) dans la mesure où on considérera tous les couples de variables pris 2 à 2. Cela revient à ne considérer que la matrice type $C_L^2$ de la relation générale (23322).

D'après l'hypothèse H 2 de recombinaison, il faudra regrouper les actions envisagées dans les différents sous-espaces E i. Afin de simplifier la conception, nous ne considérerons que la matrice $C_p^2$ de la relation (23323) mais en prenant en compte tous les couples possibles donnés par $C_p^2$ .

2.335 - Représentation de l'espace "n dimensionnel"

Ainsi que nous l'avons envisagé au § 2.331 il serait théoriquement possible de représenter toutes les situations d'un hyperespace, par une matrice gigantesque de N.n.P.p.M.m. éléments. Par une vue de l'esprit, on peut même envisager de la matérialiser par un réseau électrique possédant N.n.P.M.m. cellules élémentaires. Cette solution étant utopique pour des raisons pratiques et économiques, il est nécessaire de recourir à une représentation de l'espace "n dimensionnel" nécessitant un matériel moindre.

D'après les considérations précédentes, l'espace n dimensionnel sera représenté par ses projections de variables prises deux à deux et le nombre maximal de ces projections sera donné par le nombre de combinaisons des n variables deux à deux soit :

$$C_n^2 = \frac{n\,!}{2\,!\,(n-2)\,!} = \frac{n\,(n-1)}{2}$$

Cette représentation donne la possibilité d'inscrire dans les plans de projections des incompatibilités entre certains états d'une variable et ceux de la seconde associée, incompatibilités qui seront examinées avant toute action évolutive. En conséquence de leur fonction, ces projections sont appelées Centres d'Association de Situations.

Dès lors dans une telle représentation, l'espace n dimensionnel est "traversé" par des cylindres dont les bases reposent sur les projections bidimensionnelles et qui délimitent des hypervolumes où toutes les situations sont interdites par le seul fait de l'incompatibilité des états considérés des deux variables de la projection de référence.

Cette représentation n'est valable que pour les variables indépendantes et ne peut convenir pour représenter des hypervolumes isolés dans l'espace n dimensionnel. En d'autres termes, il ne peut y avoir modification de contraintes entre deux variables selon les états d'une ou plusieurs autres variables quelconques. Si tel était le cas, il conviendrait de projeter en sous-espaces d'ordre supérieur à deux. Ceci justifie nos hypothèses simplificatrices du § 2.334.

Moyennant l'acceptation de ces clauses restrictives, et en considérant n dimensions à P états chacune, le nombre de cellules par projection est $P^2$, le nombre de projections bidimensionnelles étant de $C_n^2$, on obtient la représentation de l'espace n dimensionnel à l'aide de :

$C_n^2 \, P^2$ cellules élémentaires, ceci au lieu de $P^n$ cellules élémentaires nécessaires en représentation intégrale (Voir fig. 2335a). L'économie de matériel permet alors la réalisation d'un tel ensemble de réseaux représentatifs de $P^n$ combinaisons possibles.

2.336 - Conclusions

L'espace "n dimensionnel" peut donc se représenter par une structure comprenant :

- n Centres d'Inscription (C.I.)
- $\frac{n\,(n-1)}{2}$ Centres d'Association de Situations (C.A.S.)
- $\frac{n\,(n-1)}{2}$ Centres d'Association d'Actions (C.A.A.).

## 2.34 - *Architecture logique d'une structure MA*

### 2.341 - Le Centre d'Inscription

#### 2.3411 - Structure générale d'u Centre d'Inscription

A - Principe

A1) Il est destiné à enregistrer et à explorer des trajectoires monodimensionnelles présentées au centre sous la forme d'une suite de valeurs entières d'une variable x :

x 1, x 2, x 3, x k, x n.

On fixe a priori le champ de variations possibles de la variable x : $1 < x < n$ et l'écart maximum que l'on peut trouver entre deux termes successifs quelconques de la suite x 1, x n :

$- s \leq \Delta x = x\,k - x\,(k+1) \leq + s.$

Dans ces conditions, le centre d'enregistrement se présentera sous la forme d'une matrice d'éléments de mémoire :

A2) Centre d'Inscription de la variable x (Voir fig. 234a)

Cette matrice comporte :

* n lignes numérotées de 1 à n, correspondant aux valeurs (ou états) de x ;
* 2 s + 1 colonnes numérotées de - s à + s et correspondant aux valeurs que peut prendre $\Delta$ x.

Chaque élément de mémoire se compose d'une bascule d'affichage (bistable) associée à des portes de coïncidence. Les lignes de la matrice sont attaquées par un double registre. Sur le premier, sont affichées les valeurs de la variable qui sont transférées, sur le second registre au cours du fonctionnement.

La sortie de ces éléments d'attaque est multipliée sur les entrées de tous les éléments de mémoire de la ligne. Toutes les sorties des éléments de mémoire d'une même colonne sont multipliées entre elles.

B - Représentation spatiale du Centre d'Inscription (Voir fig. 23411b)

- Description :

Un seul élément E correspondant à l'intersection des trois plans est excité et bascule c'est-à-dire inscrit l'élément en mémoire.

On peut voir que la situation de départ et la situation résultante correspondant à des valeurs généralement différentes des mêmes paramètres ne sont jamais simultanées. Afin que leur inscription soit possible sur un seul élément en mémoire, il est nécessaire que les informations concernant ces deux situations soient présentées simultanément au dit élément. Dans ce but, il existe une Mémoire temporaire qui retient l'information concernant la situation de départ jusqu'à l'arrivée des informations concernant la mémoire résultante.

C'est une fonction de l'élément de liaison.

- Fonctionnement :

Le C I doit s'intégrer dans un ensemble ayant pour but de simuler l'intelligence humaine. Il faut être en mesure de mettre en mémoire tous les cheminements que la structure aura "vécus" ou qu'on lui aura appris (hypothèse d'apprentissage). Notons que cette mise en mémoire peut être le résultat d'un affichage par l'homme (le professeur) de toutes les valeurs intermédiaires successives entre deux situations.

- Mise en mémoire :

Chaque élément d'inscription est caractérisé par un état 0 ou 1.

1 veut dire qu'il y a mémorisation sur un élément déterminé si :

a) la situation initiale est précisée ;

b) l'action déterminée est commandée ;

c) le résultat de cette action est connu.

2.3412 - Inscription d'un élément de trajectoire (Voir fig. 234b)

Les opérations suivantes se déroulent séquentiellement :

a) on affiche la première valeur de la variable : x = k dans le basculeur B (k) ;

b) on transfère l'information de B (k) au basculeur, B' (k) et on active une entrée sur toutes les portes d'entrée des éléments de mémoire de la kième ligne ;

c) on affiche la seconde valeur de la variable x = k + q dans le basculeur B (k + q). La sortie de celui-ci active une entrée sur chacune des portes d'entrée des éléments de mémoire situés sur une ligne diagonale passant par le point mémoire repéré par x = k + q, Δ x = 0.

Dans ces conditions, on voit qu'il n'y a coïncidence que pour un élément de mémoire, de coordonnée x = k et Δ x = q qui va se trouver excité. Il y a lieu de mettre en mémoire le vecteur permettant de passer de x = k à x = k + q, donc de reconstituer la trajectoire.

d) on transfère l'information B (k + q) dans B' (k + q) ;

e) on affiche la troisième valeur de la variable x = k + q + r et on va mémoriser comme précédemment ;

f) l'information Δ x = r dans le basculeur de coordonnées x = k + q, Δ x = r et ainsi de suite.

2.3413 - Lecture d'une trajectoire (Voir fig. 234c)

On supposera initialement qu'une seule série de coordonnées x est enregistrée et on se propose de la relire, connaissant ses extrémités de départ et d'arrivée :

- à partir de la première ligne x = n, on envoie un signal d'activation sur tous les éléments de mémoire de la ligne en coïncidence avec les sorties de toutes les bascules des éléments de mémoire. Il n'y aura coïncidence que pour l'élément de la ligne en position active qui sera le basculeur Δ x = p. Un signal actif sera alors présenté sur une ligne diagonale qui est connectée au basculeur d'entrée de la ligne x = n + p (Voir fig. 234d) ;
- le signal est utilisé pour envoyer un signal d'activation sur la ligne x = n + p. On aura coïncidence sur la sortie du basculeur de la ligne x = n + p + r et ainsi de suite jusqu'au moment où l'extrémité fixée sera atteinte.

*Remarque*

En fait, l'exploitation de la série est rythmée par une base de temps (emploi des éléments de liaison) et si la suite a k termes, il faudra k - 1 temps élémentaires pour la parcourir entièrement.

2.3414 - Recherche de la trajectoire la plus courte (Voir fig. 234e)

On partira de la valeur origine de la série. Dans ce cas, on obtiendra à chaque pas non plus une seule valeur possible pour x mais autant de valeurs et par suite autant de chemins possibles qu'il y aura de basculeurs en position 1 sur la ligne commandée.

Au second pas, on partira de toutes les valeurs fournies par la première phase et ainsi de suite jusqu'au moment où une trajectoire arrivera à l'extrémité que l'on avait fixée. On est alors bien certain d'avoir obtenu la ou les séries comportant le nombre minimal de pas.

*Nota*

A priori il n'est pas possible d'extraire tous les points en parallèle car on risquerait "d'oublier" certaines valeurs présentes à diverses reprises. De plus, les différents points n'étant pas numérotés, il serait impossible de reconstituer la suite logique des termes de la série.

En pratique, on procédera de la manière suivante : lorsqu'on arrive au terme $x_n$ fin de la série, cela signifie qu'en interrogeant la ligne d'ordre $x_{n-1}$ on a trouvé $x_{n-1}$ tel que $x_{n-1} + \Delta x_{n-1} = x_n$.

On connaît donc l'avant-dernier point de la trajectoire et on peut l'afficher sur le registre de sortie. Mais on ne connaît pas avec certitude le pas précédent car d'autres trajectoires géométriques ont pu aboutir au point $x_n$ pendant le dernier pas qui nous a menés de $x_{n-1}$ à $x_n$ et on ne peut pas choisir avec certitude le plus court chemin.

Pour lever ce doute, on recherche à nouveau la série la plus courte menant de $x_1$ à $x_{n-1}$ ce qui permet d'obtenir $x_{n-2}$ et de l'afficher. Cette méthode, basée sur le théorème de Bellmann, permet de prendre en compte notre hypothèse H 4 sur l'adaptation. Il suffit de continuer le processus jusqu'à ce que tous les points de la série soient affichés.

Il est évident que l'on peut ainsi faire apparaître plusieurs trajectoires concurrentes comptant le même nombre de pas. Il est alors possible de lever le doute en pénalisant certains trajets : un moyen simple consiste à introduire des systèmes retardateurs tels qu'il faille envoyer deux impulsions pour franchir le pas.

Sur la figure 234e qui est un diagramme donnant les x en fonction du temps, on voit nettement apparaître les divers chemins possibles, le plus court parmi eux ainsi que les boucles géométriques possibles qui se caractérisent sur le diagramme $x = f(t)$ par des chemins passant par la même valeur de x après un certain nombre de pas.

## 2.342 - Le Centre d'Association

### 2.3421 - Problème (Fig. 234f, 234g, 234h)

Supposons que l'on veuille enregistrer et exploiter des trajectoires tracées dans des espaces à plusieurs dimensions. Limitons nous à deux dimensions x, y. Le principe des centres d'inscription reste valable à condition de considérer un bloc de mémoire matriciel x, $\Delta$ x, y $\Delta$ y.

On pourra ainsi enregistrer toutes les trajectoires possibles en conservant des principes de sélection identiques mais étendus à quatre dimensions. Sans entrer dans les détails. le couple $x_n$ , $x_{n+1}$ définira une ligne d'éléments mémoire et le couple $y_n$ , $y_{n+1}$ une autre ligne. Le point commun à ces deux lignes permettra de progresser à l'intérieur du CI.

Cependant cette solution conduit à un nombre élevé d'éléments :

$1 < x, y < n$

$- s < \Delta x, \Delta y < + s$

Le CI comprendra :

$$N = \underbrace{n \cdot (2s + 1)}_{x \; \Delta \; x} \cdot \underbrace{n \; (2 \; s + 1)}_{y \; \Delta \; y}$$

$$N = n^2 \cdot (2s + 1)^2$$

Une autre solution consiste à partir de 2 CI indépendants pour x et y et à les explorer en synchronisme. On obtient N' = 2 n (2s + 1) éléments.

Malheureusement sous cette forme, le dispositif est inexploitable car il conduit à faire apparaître les trajectoires non inscrites (Voir fig. 234j). Si on veut lire la trajectoire à partir de son origine x = 0, y = 0, on voit immédiatement qu'en interrogeant la ligne y = 0 du CI y, on obtiendra deux valeurs $\Delta y = 1$, $\Delta y = 2$ qui donneront associés à $\Delta x = 1$ et fournis par CI x, deux vecteurs possibles et par suite deux trajectoires dont l'une n'a jamais été inscrite.

Par conséquent, il va falloir associer aux CI des circuits de lever de doute qui sont les Centres d'Association d'Actions et de Situations.

2.3422 - Le Centre d'Association de Situations

Pour lever le doute qui peut se trouver à chaque pas de lecture des CI, on ajoute à ceux-ci des C.A.S. destinés à fournir des critères de validité qui seront utilisés pour inhiber ou non la sortie des informations des points mémoire. Pour rester dans le cas d'une trajectoire bidimensionnelle, on trouvera :

- un C.A.S. dans lequel sont enregistrés les points permis de l'espace x y (Voir fig. 234k) ;
- un Centre d'Association d'Actions où sont stockés tous les vecteurs déplacements autorisés (Voir fig. 2341).

La structure de ces centres est voisine de celle des CI. Ils utilisent des points mémoire analogues disposés en matrices à deux dimensions x y et $\Delta$ x et $\Delta$ y. Lors de l'inscription des trajectoires, on marquera successivement tous les points mémoire correspondant aux vecteurs rencontrés :

| | | | |
|---|---|---|---|
| x 1 y 1<br>x 2 y 2<br>x 3 y 3 | dans C.A.S. | $\Delta$ x 1 $\Delta$ y 1<br>$\Delta$ x 2 $\Delta$ y 2<br>$\Delta$ x 3 $\Delta$ y 3 | dans C.A.A. |

2.343 - Mécanisme C.A.S. - C.A.A. - CI (Voir fig. 2343a)

Lors d'une exploration, on suit le processus suivant : on affiche les points d'origine par exemple Xo et Yo qui correspondent aux coordonnées du point D. Cela signifie que dans les deux CI, on envoie une commande sur les lignes Xo et Yo. Sur chaque ligne, on trouvera un certain nombre de basculeurs en position active qui fourniront sur les colonnes des CI, les $\Delta$ x et $\Delta$ y correspondants, soit :

$x = + I$

$y = + I$

Ces diverses valeurs envoyées sur les lignes et les colonnes du Centre d'Association d'Actions vont être triées. Seules, celles qui correspondent à des couples $\Delta$ x, $\Delta$ y enregistrés vont fournir un signal de sortie S 1 x et S 1 y qui est envoyé en retour vers les centres d'inscription. Notons que dans le cas présent, le tri opéré par le C.A.A. n'a éliminé aucune action.

A ce moment, on peut en déduire des valeurs possibles pour l'extrémité du vecteur X 1 et Y 1 :

X 1 = X [illegible]

Dans le cas général, il y a plusieurs vecteurs X 1 et Y 1 possibles. Ces valeurs de X 1 et de Y 1 sont envoyées vers les lignes et les colonnes du Centre d'Association de Situations et triées comme les actions. Les signaux de sortie correspondants S'x et S'y sont envoyés en retour vers les centres d'inscription et seuls les points ainsi sélectionnés X 1 et Y 1 sont considérés comme valables.

Il faut souligner que l'introduction des Centres d'Association complique les éléments mémoire de la fig. 234b, car il faudra insérer des portes à coïncidence supplémentaires (porte E T) permettant de valider ou non la sortie d'informations suivant les réponses des centres d'association (Voir fig. 2343b).

En résumé, on peut dire qu'à partir d'un point de départ on ne prendra que les vecteurs correspondant à un point d'arrivée possible, atteint à l'aide d'un vecteur également possible. Mais dans le cas général, ce procédé ne permet pas d'éliminer tous les trajets erronés. Il est possible d'imaginer des cas où un vecteur parasite, enregistré dans le Centre d'Association d'Actions puisse traverser le premier tri et conduire à un point réel, en fournissant un élément de trajectoire qui n'avait pas été rencontré dans la phase d'inscription. A ce stade, on retombe sur le même genre de difficultés signalées avec le système S.A.R.F. où des liaisons parasites étaient créées (Voir § 1.433).

2.344 - Diagramme général

La figure 2344a donne un diagramme schématique de l'essentiel des organes constitutifs d'une structure "Mémoire Active".

Les circuits marqués "CI" sont les "Centres d'inscription" dans lesquels sont mémorisés sous forme quantifiée deux types d'informations décriv décrivant les variables en jeu dans un certain problème de situation évolutive :

- des informations d'état "statique", c'est-à-dire les valeurs instantanées susceptibles d'être prises par les variables ;
- des informations d'état "dynamique" c'est-à-dire les procédures ou encore les actions possibles qui permettent à ces variables de passer d'un état statique à un autre état statique. Ces informations d'état dynamique, comme déjà mentionné, sont appelées "vecteur".

Ainsi, une certaine situation ne sera pas seulement caractérisée par la combinaison, à un instant donné, des valeurs de chaque variable, mais également par les circonstances régissant leur évolution.

A partir des centres d'inscription, on distingue d'une part les liaisons avec les Centres d'Association de Situations "C.A.S." dont le rôle a été indiqué plus haut et qui, explicité en termes concrets, consisterait à interdire la présence de deux variables en un même point et d'autre part, des liaisons avec des "C.A.A." ou "Centres d'Association d'Actions" dont la mission est de réaliser un contrôle sur les actions à l'image de celui exercé par les C.A.S. sur les situations.

Outre ces centres de base, seuls représentés en figure 2344a, la "Mémoire Active" comporte des centres de priorité, dehiérarchisation, de coordination, ce dernier réglant le déroulement de la simulation.

2.345 - Remarques

Une structure conçue selon les principes précédents combine les diverses transformations qu'elle a mémorisées pour répondre à toute demande, même si celle-ci ne correspond pas à une expérience déjà enregistrée.

Etant donné que l'ensemble des trajectoires possibles, permettant de passer d'un point SD à un point SA, est enregistré dans les CI, C.A.S. et C.A.A., rien ne prouve que ces trajectoires, compte tenu des "contraintes", permettent de relier SD à SA. Il se peut en effet (Fig. 2345a) que SD soit situé sur T 1 et SA sur T 2 n'aient aucun point commun. Il n'y a donc pas de solution au problème.

Nous avons vu qu'un système neurophysiologique placé dans ce cas élabore malgré tout une solution (quadruplet d'hypothèses complémentaires). Il est concevable également d'en faire trouver une par la structure précédemment définie.

L'hypothèse H 6 d'imagination peut se prendre en compte en réalisant un système logique qui supprime la corrélation existant entre deux variables dans leur C.A.S. La suppression d'une telle contrainte peut en effet conduire à l'imagination de la solution. Cette faculté est appelée aussi "fonction de projection".

L'hypothèse H 7 d'abstraction peut également être satisfaite en négligeant volontairement une variable. Cela revient à faire abstraction d'une donnée d'entrée qui pouvait "bloquer" le problème. D'une certaine manière, il est possible de ne pas tenir compte de la valeur d'une ou plusieurs des coordonnées des points de départ et de but, lorsque la valeur de cette coordonnée est de peu d'intérêt pour la solution cherchée.

Il est possible aussi d'étendre à tous les niveaux de chaque variable, les vecteurs mémorisés à chacun. De même une expérience vécue est enregistrée pour un problème P i peut être réutilisée pour un problème P i de dimension plus large. Cette faculté satisfait bien à l'hypothèse H 8 de généralisation.

Enfin en cas d'insuccès dans les recherches précédentes, il est possible de déclencher un processus d'exploration au hasard dans l'ensemble des réseaux qui composent la structure (satisfaction de l'hypothèse H 9 sur la recherche au hasard).

Sur la figure 2345a, la recherche au hasard permettrait de passer de la trajectoire T 1 à la trajectoire T 2 par le premier vecteur H 1 issu d'une famille de vecteurs essayés au hasard, rendant possible la liaison T 1 à T 2. La recherche au hasard établit un pont entre deux ou plusieurs trajectoires dans le but de relier SD à SA.

## 2.4 - MODES de FONCTIONNEMENT d'une "MEMOIRE ACTIVE"

La "Mémoire Active" peut fonctionner de quatre façons différentes :

- en inscription positive,
- en inscription négative,
- en générateur de cycles,
- en reconnaissance de formes.

### 2.41 - *Inscription positive*

Dans ce mode de fonctionnement, toutes les trajectoires susceptibles de conduire à la solution sont enregistrées. La structure prend en compte un certain nombre d'expériences décrites comme des cheminements pour élaborer un processus d'association. Ces cheminements peuvent lui être communiqués par un dispositif d'entrée de données ou être mémorisés au cours de l'élaboration des problèmes antérieurs. Il y a lieu de noter que dans cette dernière éventualité, les performances de la machine s'améliorent au fur et à mesure qu'elle traite des problèmes (prise en compte de l'hypothèse H 5 d'apprentissage).

Quand la structure possède une expérience suffisante, on peut lui demander de fixer une stratégie optimale entre deux situations données. L'optimisation se fera avec le plus petit nombre possible de vecteurs d'action.

Les deux situations peuvent appartenir à un même comportement antérieurement mémorisé. Dans ce cas, la mémoire utilisera toute information nouvelle pour donner une stratégie simplifiée. Mais les deux situations peuvent appartenir à deux comportements différents. A ce moment-là, la machine doit être capable de faire un choix dans l'ensemble des actes mémorisés pour combiner leur enchaînement en liant les deux situations proposées.

Dans l'optique de définir des machines opérationnelles, chaque acte impliquant la commande d'une action devrait se faire en temps réel. Il faut attendre qu'une opération soit terminée avant de pouvoir commander la suivante. Au cours de cette attente la machine est capable de déterminer à nouveau la stragégie à adopter, au cas où des informations nouvelles lui seraient données (hypothèse d'adaptation).

### 2.42 - *Inscription négative*

Dans ce mode de fonctionnement, on inscrit les interdictions et les contraintes. Tout le reste de l'espace est autorisé. Ainsi on introduit dans la mémoire les états et les combinaisons autorisés et associables suivant certaines règles. Le travail consiste à construire de toutes pièces les cheminements qui lui sont demandés, en respectant l'ensemble des contraintes imposées. L'activité négative correspond à une activité "constructrice".

Etant donné la particularité de ce mode de fonctionnement, les fonctions d'imagination, d'abstraction, de généralisation et de recherche au hasard ne peuvent être prises en compte aussi facilement qu'en inscription positive. La fonction d'abstraction par exemple serait intéressante pour supprimer une contrainte lorsqu'un problème n'a pas de solution.

Malgré tout, la machine en inscription négative apparaît comme une machine moins générale que la structure en inscription positive.

### *2.43 - Génération de cycles*

Dans le fonctionnement habituel, un signal déclenche l'arrêt des processus de recherche dès que la situation finale est atteinte. Il suffit de supprimer un tel signal pour qu'indéfiniment la mémoire parcoure le cheminement qui la ramène à cette situation.

Il s'opère une suite ininterrompue de commandes d'actions diverses. On se trouve devant une activité automatique aussi complexe que l'on voudra. Il sera possible de la changer en modifiant simplement la situation du point d'arrivée affiché.

Si cette modification est effectuée pendant le cycle, la machine trouve en outre le cheminement transitionnel entre la situation actuelle et le cycle nouveau. On peut envisager une deuxième machine qui puisse déclencher pas à pas des suites plus ou moins longues de cycles très complexes avec un minimum d'informations à donner. C'est très probablement ce qui se passe en physiologie nerveuse où un comportement automatique tel que la marche, est déclenché ou arrêté, mais pas contrôlé consciemment. Ainsi le passage de la marche à la course se fait par une transition adaptée.

### *2.44 - Reconnaissance des formes*

Lorsqu'il est possible de ramener deux phénomènes à une représentation par un ensemble de points ou de vecteurs dans un référentiel ou dans deux, liés par une loi de transformation, il est possible de reconnaître si l'un de ces ensembles est contenu dans l'autre.

Différents procédés existent pour prendre en compte les phénomènes de distorsion, d'approximation, pour tenir compte des probabilités d'existence d'un point à un endroit donné. Ce procédé qui a été étudié pour la reconnaissance automatique des empreintes digitales s'applique à la lecture automatique des photographies ainsi qu'à la recherche documentaire. Il est à signaler que la recherche ayant lieu en parallèle, le temps d'exploration est strictement proportionnel à la complexité du plus petit des ensembles quelle que soit l'importance du plus grand.

## 2.5 - TYPES STRUCTURAUX

### 2.51 - *La mémoire graphe*

C'est un modèle électronique de graphe pondéré. Il est capable de résoudre des problèmes d'optimisation, et peut s'appliquer également à la résolution des problèmes de distribution dits du "commis-voyageur" quel que soit le nombre de sommets et d'arcs. L'exploration en parallèle donne des temps de réponse extrêmement brefs puisqu'ils sont uniquement fonction de la durée de parcours du chemin le plus court, ceci quelle que soit la complexité du graphe exploré.

Exemple d'une structure "Mémoire graphe" :

Le principe, illustré par le figure 25a, consiste, ayant défini les noeuds origine et terminal :

- à chercher des noeuds immédiatement antérieurs au terminal et noter pour chacun le coût du trajet correspondant (en cette première étape il n'y à pas de choix possible) ;
- à partir de ces derniers, chercher à nouveau tous les noeuds précédents et noter après choix, le coût du trajet le plus court pour se rendre de chacun d'eux au noeud terminal ainsi de suite par approche successive.

Les remarques fondamentales à faire sur ce processus sont :

- la recherche s'effectue par étapes successives et parallèlement pour tous les chemins (hypothèse H 2 de parallélisme) ;
- le coût du trajet le plus court résulte d'un choix opéré au niveau seul du noeud intermédiaire en cause entre les coûts calculés par addition des pondérations des mailles de liaisons aux coûts minimaux des trajets effectuables à partir des noeuds testés et notés au cours de l'étape précédente.

La programmation dynamique établit en application de ce processus une formule de récurrence exploitable dans certains cas par ordinateur.

Voyons, parallèlement à cette méthode, comment la logique câblée de la "Mémoire Active" réalise ce processus, tout au moins quant au principe et reportons-nous à la figure 25a représentant une structure de réseau simplifiée pour les besoins de la démonstration.

Les mailles sont pondérées selon les chiffres y attenant et orientées comme les flèches extérieures.

Les traits tiretés longs sont les lieux géométriques des noeuds à partir desquels on peut atteindre le noeud d'arrivée en un même nombre d'étapes, ce nombre étant par ailleurs indiqué et cerclé en regard.

Dans les explications suivantes, on désignera d'une part chaque noeud par ses coordonnées (x, y) : le noeud de départ étant le noeud (1, 1) le noeud d'arrivée (6, 4) ; et d'autre part, les mailles par les couples de coordonnées correspondant aux noeuds origine et extrémité.

Dans le simulateur "Mémoire graphe", chaque maille et chaque noeud sont représentés par un élément logique que l'on peut assimiler très grossièrement à une porte électronique associée à une mémoire à deux informations : oui - non. Les mailles sont en outre dotées d'un élément pondérateur, c'est-à-dire d'un petit compteur binaire.

Un générateur émet à partir du noeud d'arrivée et dans tout le réseau des impulsions électriques qui parcourent les mailles à rebours en provoquant dans leur élément pondérateur le décompte de la pondération. Lorsqu'un pondérateur parvient à zéro, il mémorise la maille et le noeud correspondant, rendant ce couple d'éléments conducteur, tandis qu'il interdit la mémorisation des autres mailles atteignant le même noeud.

Ainsi, à la 3ème impulsion, la maille (6, 3 - 6, 4) est mémorisée ainsi que le noeud (6, 3). A la 4ème impulsion, la maille (5, 3 - 6, 3) est mémorisée de même que le noeud (5, 3) et ainsi de suite, de sorte que le choix entre les trajets possibles à partir de chaque noeud est systématiquement fixé.

A la fin de l'opération (27ème impulsion) il y aura dans notre exemple, mémorisation de la maille (1, 1 - 1, 2) seule parmi celles issues du point de départ.

La continuité d'un circuit électrique que l'on peut suivre par les mailles "mémorisées" et fléchées sur la figure : (1, 1) - (1, 2) - (2, 2) - (3, 2) - (3, 3) - (4, 3) - (5, 3) - (6, 3) - (6, 4) est ainsi réalisée et peut être visualisée de manière convenable.

On peut remarquer qu'au niveau des noeuds à partir desquels on peut atteindre le point d'arrivée en 4 étapes (noeud (4, 2)), il y a deux itinéraires possibles en 16 pas de pondération. Dans le cas où la trajectoire optimale atteindrait ce noeud, la "Mémoire graphe" indiquerait les deux solutions, ou ferait un choix selon des règles de priorité ayant pu lui être fournies.

Nous avons, sur la figure, représenté entre parenthèses le coût du trajet le plus court de chaque noeud du réseau au noeud d'arrivée ; ceci était commode pour établir manuellement la "mémorisation" des mailles et retenir les coûts partiels mais ce pourrait être aussi une application brute du principe d'optimalité en machine traditionnelle, ce qui procurerait l'avantage immédiat d'une économie de mémoire importante du fait que l'on n'a besoin de retenir que les coûts relatifs aux seuls noeuds de l'étape précédente.

Cependant il est nécessaire, de ce fait même, de réitérer la recherche autant de fois qu'il peut y avoir d'étapes car à la fin de l'analyse du réseau, on ne connaît en mémoire que le noeud de départ et les noeuds immédiatement voisins.

Dans notre exemple, à la fin de la première analyse, seule serait donc connue la maille (1, 1 - 1, 2). Prenant alors le noeud (1, 2) comme nouveau point de départ, une nouvelle analyse fournirait la maille (1, 2) - (2, 2) et instituerait le noeud (2, 2) comme nouveau point de départ. Au bout de huit itérations, la trajectoire complète serait construite.

### 2.52 - *La "Mémoire Active" proprement dite*

C'est la structure complète décrite au § 2.34. Cette architecture s'écarte des chemins classiques de l'automatisme pur, en ce sens qu'elle combine des informations et les enchaîne d'une façon différente selon le problème posé. C'est à ce titre que le Docteur SAUVAN établit une analogie entre son fonctionnement et celui d'une "boîte noire" que constitue le cerveau.

## 2.6 - CONCLUSIONS

Ces considérations sur les structures "Mémoires Actives" nous ont permis de montrer dans quelle mesure elles satisfaisaient aux neuf hypothèses établies d'après l'examen des systèmes neurophysiologiques. Elles nous ont permis également de donner un aperçu sur la réalisation physique de la structure moyennant d'autres hypothèses simplificatrices qui ont conduit à réduire considérablement le nombre d'éléments au détriment de la probabilité d'erreur. Nous avons vu notamment que des vecteurs parasites pouvaient s'introduire dans le C.A.A. Pour les éliminer, il faudrait peut-être reconsidérer aussi les couples de variables 3 par 3, ou 4 par 4, etc., ce qui augmenterait rapidement la complexité, le prix et le temps de traitement. Ce qui importe, c'est de trouver un compromis acceptable entre des paramètres contradictoires.

Ainsi la structure "Mémoire Active", dans l'acceptation actuelle du terme, n'apparaît pas comme une structure parfaite, mais comme une structure très intéressante pour donner des solutions en moyenne voisines de l'optimum, dans des temps très courts compatibles avec des travaux en temps réel. Aussi ce sont des atouts précieux qui peuvent lui ouvrir de nombreux domaines d'applications dont nous essaierons de donner un aperçu au chapitre III.

# CHAPITRE 3

## Les DOMAINES d'APPLICATIONS POSSIBLES des STRUCTURES "MEMOIRES ACTIVES"

## 3.1 - GENERALITES

Conçues à l'image de notre comportement, les structures "Mémoires Actives" auraient la propriété extrémement importante de pouvoir résoudre des problèmes complexes tels que celui de l'utilisation de moyens de types variés, de manière efficiente ; le terme de "moyens", abstrait, pouvant représenter des hommes, de l'argent, des machines, des voies de circulation, etc.

De tels problèmes, d'essence combinatoire et connus sous le vocable "processus d'allocation" sont étudiés généralement en économétrie et en recherche opérationnelle, et abordés par les techniques de calcul utilisant les ordinateurs en examinant sucessivement toutes les combinaisons possibles susceptibles de constituer une solution. Ces techniques n'aboutissent qu'au prix d'une augmentation considérable des volumes de mémoires et avec des temps de traitement vite prohibitifs.

Rechercher la manière efficiente d'utiliser divers moyens suppose ceux-ci définis en qualité et quantité. La structure fonctionnelle de ces moyens est donc connue et l'application réalisée.

Dans cette dernière hypothèse, une certaine organisation de ces moyens ayant été perturbée, l'emploi d'une machine capable de résoudre rapidement le problème de réordonnancement qui se pose sous forme d'une suite de décisions à élaborer, se trouve donc assez naturellement adapté.

La Mémoire Active, de par sa structure particulière, permettrait d'aborder ces problèmes combinatoires plus facilement que les machines traditionnelles. Elle se distingue en effet de ces dernières par le fait qu'elle travaille de façon synthétique, expérimentale, évolutive, et parallèle par opposition à la plupart des machines traditionnelles qui travaillent de façon analytique, numérique, figée et séquentielle.

Ainsi, un premier emploi de la mémoire active, application *tactique*, consisterait en un traitement des problèmes au moment même où l'action s'effectue. Dans ce cas, la machine, intégrée au système, aurait le caractère spécifique des moyens propres au phénomène contrôlé.

Elargissant cette application, on peut songer à l'utilisation de ces machines sur un plan *stratégique* afin de combiner et diriger un ensemble de moyens, ressources et dispositions en vue de la préparation et de la création optimales de systèmes.

## 3.2 - ORDONNANCEMENTS d'ATELIER

### 3.21 - Les problèmes d'ordonnancement en général - Introduction

La gestion moderne des entreprises tend à faire reculer le plus possible la prise de décisions, à la renvoyer au niveau des options fondamentales. Elle est remplacée par des échelons intermédiaires grâce à l'évaluation exacte des conséquences de l'adoption de telle ou telle stratégie.

Aussi le chef d'entreprise a-t-il besoin d'informations à long terme pour son potentiel d'exécution et même de conception, de façon à réduire au minimum l'intervention de l'aléatoire dans ses décisions. Il est toujours souhaitable d'évaluer les conséquences exactes de l'acceptation ou du refus d'une commande nouvelle pour laquelle des délais de fourniture sont imposés, de la priorité à donner à telle ou telle tâche, de l'achat de machines neuves, de l'embauche de personnel. Outre son intervention dans le rendement optimum global d'une entreprise, ce devrait être le rôle de l'ordonnancement que d'apporter, par des simulations d'hypothèses, ce type de renseignements aux responsables.

Dans une usine où la variété des objets à produire est grande, il est toujours possible de prévoir pour les quelques jours à venir la répartition des tâches entre les moyens dont on dispose et d'arriver au plein emploi de ceux-ci. Mais l'efficacité à court terme (domaine tactique) de ces plans de charge cache leurs répercussions souvent désastreuses à long terme (stratégie) sur les fabrications globales et l'observation des délais.

Lorsqu'il s'agit d'une tâche unique complexe (ordonnancement de grands navires,d'ensembles immobiliers, de prototypes de missiles, etc.) ces répercussions apparaissent très clairement.

Dominateur commun :

Malgré leur immense diversité, les problèmes d'ordonnancement ont un lien commun très fort, celui de leur *aspect fortement combinatoire*. Le moindre d'entre eux exige un choix entre des millions de solutions. De ce fait, un examen complet se trouve hors de portée des moyens classiques de traitement de l'information, par contre il semble tout à fait abordable par une structure "Mémoire Active".

### 3.22 - Ordonnancement à moyens finis

D'après M. LANGHADE(1) il faudrait distinguer les ordonnancements à *moyens infinis* de ceux à *moyens finis*.

(1) Ingénieur en Chef de l'atelier de construction de Tarbes.

L'ordonnancement à capacités infinies serait l'ordonnancement qui se rattache au PERT (ordonnancement sans contraintes disjonctives ni cumulatives). Par contre, l'ordonnancement à capacité finie tiendrait compte de toutes les contraintes.

### 3.23 - *Terminologie*

- Tâche - C'est la réalisation d'un projet, qu'il s'agisse de la fabrication d'un objet, d'une prévision de financement ou de toute autre action.

- Gamme - Chaque tâche est représentée par sa gamme, c'est-à-dire par la description linéaire des opérations nécessaires à sa réalisation.

- Objet - C'est l'ensemble "insécable" qui est soumis à une gamme. S'il n'y a qu'un objet par tâche, les termes "objet" et "gamme" sont équivalents. Un objet est soit "unique", soit "série".

- Suite - Elle est faite de plusieurs objets uniques ou de plusieurs séries.

- Moyen - Il représente tout le système bien défini nécessaire à l'accomplissement d'une tâche. C'est la machine qui permet la réalisation de la tâche. Il est bien entendu que le nombre de moyens identiques est limité et pose des problèmes d'affectations simultanées à différentes tâches. L'établissement des gammes est un ordonnancement conçu en supposant le nombre de moyens finis.

- Entreprise - C'est la réalisation d'un projet qui nécessite la convergence de deux ou plusieurs gammes. Une entreprise peut être décrite par un graphe du type PERT.

- Contrainte de subordination ou contrainte conjonctive - Elle représente la nécessité de ne commencer une tâche qu'après réalisation d'une ou plusieurs autres.

- Contrainte de partition - Au cours d'une gamme, un objet peut se disjoindre en deux ou plusieurs objets dérivés ayant dès lors chacun leur propre gamme.

- Contrainte disjonctive - C'est l'impossibilité d'affecter un moyen à plus d'une tâche à la fois.

- Contrainte cumulative - C'est un affaiblissement de contrainte disjonctive dû à la présence d'un nombre plus ou moins grand de moyens d'un même type.

- Temps utile - Il représente la durée d'affectation d'un moyen à la réalisation d'une opération de la gamme.

- Attente - C'est la durée pendant laquelle il est nécessaire qu'une tâche demeure sans opération pour qu'elle subisse une opération sans contrainte disjonctive.

- Stockage - C'est la durée non prévue dans la gamme pendant laquelle une tâche devra attendre, sans nécessiter un moyen non disponible.

### 3.24 - *Aspects fondamentaux du problème d'ordonnancement*

Dans sa version la plus complexe, un ordonnancement comprend les facteurs suivants :

- il est relatif à des tâches distinctes ne concourant pas à la réalisation d'une entreprise unique ;
- ce sont les mêmes moyens qui doivent être répartis entre des tâches distinctes ;
- le nombre de moyens varie au cours du déroulement de l'ordonnancement ;
- chaque tâche est composée d'une suite de plusieurs objets distincts, chaque objet pouvant être constitué d'une série ;
- les objets successifs d'une même suite peuvent être sur gamme (à des stades différents) en même temps ;
- certaines gammes comportent l'emploi simultané de deux ou plusieurs moyens ;
- les contraintes de subordination (correspondant par exemple à un diagramme type PERT) peuvent se compliquer de contraintes de partition qui transforment à la fin d'une tâche un objet en deux ou plusieurs autres objets ;
- les contraintes de subordination peuvent prévoir des fournitures extérieures à date fixe ;
- dans certains cas les objets d'une suite sont exclusifs les uns des autres, c'est-à-dire qu'il faut qu'un objet soit fini pour mettre le suivant en chantier ;
- lorsque plusieurs moyens sont affectés concurremment à un objet, ils le sont exactement en même temps.

### 3.25 - *Exemple de résolution d'un PB d'ordonnancement par une structure* MA (Voir fig. 325a)

Considérons deux objets 1 et 2 (des pièces par exemple) devant être traités sur les machines A, B et C.

Dans l'espace bidimensionnel OX, OY, la gamme de l'objet 1 est reproduite sur OX, celle de l'objet 2 sur OY.

Il est possible de déterminer par une structure MA la trajectoire la plus courte pas à pas, entre les points SD et SA, cette trajectoire ne devant pas pénétrer dans les surfaces interdites.

En règle générale, il est rare que l'on ait à ordonnancer des objets uniques. Il s'agit très généralement de suites d'objets en nombre plus ou moins grand. Le nombre de dimensions devenant égal au nombre d'objets, l'élaboration d'une solution optimale consiste à rechercher une trajectoire dans un hypervolume.

## 3.26 - Les buts de l'ordonnancement

Les algorithmes d'ordonnancement sont tous plus ou moins fondés sur deux principes :

- priorité aux tâches urgentes ;
- prise du premier moyen libre par les tâches en attente.

Il est évident que ces principes apparemment satisfaisants peuvent conduire à des pertes de rendement considérables.

Les objectifs d'un ordonnancement :

Ils sont plus complexes à définir qu'il n'en paraît, surtout pour les ordonnancements d'usine, puisque le plan de charge suffit à donner l'illusion d'une utilisation correcte des moyens. Dans ce cas, l'ordonnancement peut jouer un rôle fondamental pour les éventualités suivantes :

1 - Affectation d'une priorité avec le moins de perte de rendement possible de l'usine ;

2 - Evaluation des conséquences sur les autres tâches de cette affectation de priorité ;

3 - Evaluation des possibilités de prise en compte de tâches nouvelles et réaction sur l'ensemble de la production.

Les simulations pour des structures "Mémoires Actives" se faisant en des temps extrêmement courts, quelques secondes pour plusieurs centaines de tâches, peuvent être très précieuses au moment des décisions à prendre ou des mesures à adopter (défaillance de certains moyens). Il est alors possible d'essayer des solutions dont le choix n'appartient plus à l'ordonnancement mais à une politique générale. En ce sens, il s'agit, en supprimant un facteur aléatoire (le temps d'accomplissement des tâches) d'apporter une aide à la décision.

En résumé, les mémoires d'ordonnancement d'atelier simulent sur des intervalles de temps très longs la fabrication d'objets en tenant compte des moyens existants (en hommes et matériel) et en les utilisant au mieux. Ces mémoires sont conçues de telle sorte qu'il soit possible :

- de donner des priorités relatives d'un objet par rapport aux autres,
- faire varier le nombre de moyens (en plus ou en moins) pour déterminer la stratégie la plus économique en fonction de l'objectif à atteindre (augmentation du niveau de production, rattrapage des retards).

Ces structures seraient particulièrement utiles pour la réalisation de grands projets.

### 3.27 - Applications possibles

Les problèmes d'ordonnancement susceptibles d'être résolus par des structures "Mémoires Actives" seraient :

- les problèmes d'ordonnancement d'atelier (diagramme de Gantt). Il s'agit de l'ordonnancement à long terme d'une fabrication en tenant compte très fidèlement des moyens existants ;
- des problèmes de recherche de chemin critique dans les programmes de construction (établissement automatique des diagrammes PERT(1)) ;
- des problèmes d'ordonnancement à choix de moyens. C'est une classe de problèmes extrêment importante car elle conduirait à un ordonnancement optimum non seulement en temps ou en coût mais aussi en moyens (intégration des coûts d'attente des machines non utilisées).

### 3.28 - Remarques

Pour donner une idée de l'importance des problèmes d'ordonnancement dans les grandes usines modesnes, signalons par exemple le cas de l'entreprise SOLLAC où des études ont montré qu'il y aurait 15 000 informations à prendre en même temps. Dans ces conditions, le niveau combinatoire est tel qu'on ne peut résoudre globalement le problème par ordinateur.

En fait, on essaie d'approcher timidement cette muraille du combinatoire en ne considérant que des petits sous-problèmes indépendants et faciles qui peuvent se traiter sur des machines classiques dans des temps raisonnables. Or néanmoins, l'opération de gestion coûte très cher, et de plus elle est mal faite (théoriquement) car on sait bien que l'optimum d'une somme n'est pas la somme des optima de chacun de ses termes. Cette remarque permet de mesurer le gigantisme du problème.

Pourtant il semble que les structures nouvelles telles que la "Mémoire Active" permettraient d'approcher avec plus de précision ce type de problème mal résolu par les moyens actuels.

(1) Notons que les diagrammes PERT classiques supposent que les moyens peuvent toujours être affectés aux tâches (pas de contraintes disjonctives). Or en réalité, une optimisation globale devrait intégrer en plus cette grandeur ; variante très importante qui peut être prise en compte sur les structures "Mémoires Actives".

## 3.3 - RECONNAISSANCE des FORMES

### 3.31 - Généralités

Les structures "Mémoires Actives" adaptées à la reconnaissance des formes ont pour objet de déceler dans un ensemble de références l'existence d'un sous-ensemble identique ou lui ressemblant.

Ces applications peuvent s'adapter à des utilisations variées :

- lecture automatique de caractères ;
- reconnaissance d'une constellation vue à travers un télescope ou un sextant ;
- reconnaissance automatique de photographies de missions aériennes ou spatiales ;
- navigation automatique d'un aéronef en comparant à une carte d'Etat Major le relief mesuré par les équipements du bord ;
- exploitation rapide des missions aériennes photographiques (cette exploitation pouvant même être effectuée à bord de l'appareil ou de l'engin au fur et à mesure du déroulement de la mission) ;
- reconnaissance des signatures ;
- reconnaissance automatique de trajectoires dans les chambres à bulles (énergie atomique) ;
- reconnaissance d'empreintes digitales pour les banques ou la police. L'idée fondamentale est de les reconnaître dans un espace à trois dimensions dans lequel la troisième dimension est constituée par la valeur des tangentes aux courbes de certains points caractéristiques ;
- reconnaissance automatique de contrefaçons de marques, etc.

### 3.32 - Aperçu sur le principe

Dans son acceptation usuelle, la reconnaissance des formes peut être assimilée à une simplification, à un appauvrissement de l'environnement. Cela constitue un prétraitement de l'information de manière à n'avoir à manipuler que des classes d'objets au lieu des objets eux-mêmes en tant qu'individus distincts.

D'après la psychologie nous reconnaîtrions une image non pas par sa description complète, mais par la présence de certains traits caractéristiques conservant entre eux des relations spatiales plus ou moins étroites.

Tout ce qu'enseigne la physiologie est que dans notre cerveau il y aurait une véritable transcription de l'image en une représentation dans un espace à grand nombre de n dimensions.

Compte tenu de ces considérations, il existerait en plus une série d'étapes intellectuelles que les machines informatiques actuelles sont bien incapables de franchir. Une structure "Mémoire Active" est donc susceptible d'apporter des solutions intéressantes dans ce domaine.

Pour la "Mémoire Active", la forme à reconnaître constitue un ensemble de points d'un réseau. La forme de référence est décrite par une chaîne de vecteurs équivalente à la chaîne de vecteurs d'action ; et il faut chercher à placer cette chaîne dans l'ensemble des points du réseau. Dans le premier cas il faut entrer *un but* et *des états*, la sortie étant une suite d'actions.

Dans le deuxième cas, il faut entrer également des états, mais avec une chaîne d'actions, la sortie étant un but qui indique le succès de la reconnaissance. Dans les deux cas, l'exploration se fait naturellement suivant un processus de parallélisme (prise en compte de l'hypothèse H 2).

*Remarques :*

Les acquisitions récentes de la neurophysiologie porteraient à croire que l'opérateur primaire du système nerveux n'est pas un opérateur logique mais une procédure de reconnaissance des formes. Toute logique serait ainsi une conséquence de ce phénomène primaire et non sa cause.

### *3.33 - Conclusions*

Cette structure "Mémoire Active" appliquée à la reconnaissance des formes est destinée à relayer l'intervention de l'homme lorsqu'on demande à celui-ci de prendre une décision semi-intuitive quant aucun procédé de calcul actuel ne peut intervenir et que l'on sait qu'une solution logique existe en théorie. Dans de tels cas, il est rare que la solution humaine soit judicieuse et qu'elle ne comporte pas une grande part d'erreurs à plus ou moins long terme.

La caractéristique commune de ces domaines d'applications est leur grande complexité et la nécessité de prendre une nouvelle décision à chaque étape.

## 3.4 - REGULATION de TRAFIC

### 3.41 - Généralités

Les "Mémoires Actives" d'organisation des réseaux (routiers, ferrés, aériens ou de transmissions) auraient pour objet d'ordonnancer les trafics en vue d'utiliser au mieux l'infrastructure existante, elles pourraient de plus :

- déterminer les améliorations les moins coûteuses pour écouler un trafic déterminé ;
- connaître les nouveaux routages à effectuer en cas de destruction ou d'obstruction partielle.

Les domaines d'application pourraient être les suivants :

- trafic aérien ;
- trafic routier ;
- trafic maritime et fluvial ;
- trafic ferroviaire.

### 3.42 - Application au trafic aérien

Il est possible d'envisager les applications suivantes :

#### 3.421 - Calcul des routes à temps minimum dans les vols transocéaniques

Etant donnés deux aéroports éloignés, situés par exemple de part et d'autre de l'Atlantique nord, rechercher, compte tenu des vents, l'itinéraire à temps minimum (I.T.M.).

La vitesse propre de l'avion (par rapport à l'air) est fixée et peut, en première approximation, être considérée comme constante. Si le vent est nul, l'I.T.M. est évidemment l'orthodromie.

En effet, s'il n'y a pas de vent, le lieu des points qui peut être atteint par l'avion au bout de l'unité de temps est un cercle dont le rayon est égal à la distance franchie par l'avion dans cette unité de temps.

S'il y a du vent, la composition des vitesses vent et avion montre que le lieu des points en question est également un cercle de même diamètre, mais dont le centre est l'extrémité du vecteur représentant la vitesse du vent.

A chaque point de la carte (centre de paramètre), on attache le cercle excentré défini ci-dessus (en admettant une quantification assez fine pour que l'on puisse parler de cercle) ; on a ainsi l'instruction définissant le "pas" pour le point en question. Lorsque ce point sera touché, il autorisera pour le "pas" suivant tous les points du cercle (sauf évidemment les inhibitions dues aux recoupements de trajectoires d'autres aéronefs).

3.422 - Ordonnancement de la rotation des avions commerciaux et des équipages

3.423 - Planning d'entretien de la flotte aérienne

3.424 - Affectation de moyens défensifs contre des avions ennemis

3.425 - Problème de tri des bagages dans les aéroports internationaux

Ce type de problème serait, paraît-il, le plus urgent des problèmes d'ordonnancement qui se posent aux compagnies aériennes. Il aurait déjà été formulé par l'aéroport de Montréal.

3.426 - Gestion de la circulation aérienne dans les zones terminales pour éviter les collisions (gestion particulière connue sous le nom de "problème d'aéroport")

Etant donné une piste (AB) banalisée (Voir fig. 3426a) pour l'atterrissage et le décollage et un certain trafic d'avions devant atterrir et décoller, dans quel ordre faut-il affecter les avions à la piste afin que le temps global d'attente des avions soit minimum ? L'heure d'arrivée des avions peut être considérée comme une variable aléatoire. L'attente des avions en vol s'effectue en leur faisant effectuer des circuits d'attente fermés appelés "hippodromes". Les avions au sol peuvent évidemment attendre en dehors de la piste AB sur des voies de départ. La nature des avions étant différente, il existe bien entendu une utilisation optimum de la piste qui minimise globalement le temps d'attente des avions aussi bien en vol, qu'au sol.

*3.43 - Application au trafic routier*

3.431 - Régulation de la circulation urbaine

Le problème consisterait à guider les automobilistes circulant dans une localité importante, vers les lieux de destination, à partir de tous les points névralgiques. Ce guidage serait effectué suivant des itinéraires variables, redéterminés périodiquement et tenant compte à chaque instant :

- de l'état d'encombrement des différentes artères,
- de la réglementation en vigueur,
- d'éléments impondérables, accidents, travaux, etc.

Le principe serait le suivant :

- chaque point névralgique serait matérialisé par un module "point", et les rues ou parties de rues joignant deux "points" névralgiques voisins par deux vecteurs, l'un ayant un des "points" pour origine, l'autre pour extrémité et inversement.

Des "retardateurs" pourraient être associés à chaque vecteur pour lui conférer une pondération en fonction des critères adoptés. Un dispositif cyclique afficherait alors successivement chaque point névralgique comme point d'arrivée et tous les autres points comme points de départ. Le dispositif élaborerait de la sorte des groupes d'itinéraires, partant de tous les points névralgiques, qui convergeraient vers un seul point.

Des itinéraires optimisés seraient alors portés à la connaissance des automobilistes au moyen de panneaux lumineux ou électromécaniques placés avant chaque carrefour. Ils leur indiqueraient la direction (tourner à droite, à gauche ou aller tout droit) à prendre pour se rendre dans les meilleures conditions au point de destination qu'ils considéreraient comme le plus voisin de l'endroit où ils devraient se rendre.

### 3.432 - Contrôle centralisé d'un ensemble de feux

Ce problème consisterait à fluidifier une circulation urbaine en déterminant les temps d'allumage des feux, compte tenu des densités respectives de circulation pour les différentes artères. Cette question est déjà traitée en partie à Toulouse et Grenoble par des moyens analogiques. Nous pensons qu'elle pourrait l'être aussi par une structure "Mémoire Active".

## *3.44 - Application au trafic maritime et fluvial*

Il est possible d'envisager l'application de structures "Mémoires Actives" à :

- la rotation des bâtiments de commerce pour en améliorer la productivité ;
- au planning d'entretien de la flotte maritime ;
- la gestion des quais de ports (problème connu généralement sous le vocable de "gestion des terminaux") ;
- l'utilisation optimum des grandes écluses des canaux compte tenu du trafic amont et aval.

## 3.5 - APPLICATIONS DIVERSES

Dans ce paragraphe, nous avons voulu signaler certaines applications possibles et originales des "Mémoires Actives" qui n'ont pas encore été complètement explorées mais qui seraient susceptibles d'un développement intéressant.

### 3.51 - *Gestion des télécommunications téléphoniques*

Sur les lignes téléphoniques saturées à certaines heures, il serait intéressant de pouvoir gérer les communications de façon à les acheminer au mieux avec les lignes existantes. Il y a donc un problème d'affectation des communications aux lignes téléphoniques pour relier deux points A et B par exemple. Cela revient donc à trouver un cheminement optimum dans un réseau, problème tout à fait abordable avec une structure "Mémoire Active".

### 3.52 - *Augmentation des vitesses d'intervention de certains services publics*

Ces services sont en l'occurrence, les services de police, les corps de sapeurs pompiers, les ambulances. Le dispositif serait alors utilisé de la manière suivante.

L'association des "points", "vecteurs" et "retardateurs" reproduirait, comme dans l'application sur la régulation de la circulation urbaine, le plan de la localité.

Tous les points où se trouveraient stationnés les éléments destinés à intervenir (polices et ambulances en cas d'accident, sapeurs pompiers en cas d'incendie) seraient affichés comme "point" de départ.

Un système d'arrêt interne stopperait la recherche dès qu'un itinéraire auraît été déterminé et déclencherait son affichage. On aurait de la sorte l'indication du lieu où se trouve le service compétent capable d'intervenir le plus rapidement ainsi que l'itinéraire qu'il devrait emprunter.

### *3.53 - Optimisation du problème des évacuations*

Cette application serait un corollaire de la précédente. Ici c'est le lieu de sinistre qui serait affiché comme point de départ et les lieux de stationnement des services compétents qui seraient affichés comme point d'arrivée. Comme précédemment, le dispositif déterminerait le point où se trouverait le service le plus rapidement accessible et indiquerait le parcours à suivre pour s'y rendre.

### *3.54 - Composition des parfums*

La composition des parfums étant basée sur des interactions, apparaît comme un art essentiellement combinatoire qui exploite les propriétés associatrices des corps odorants. Il ne faut donc pas s'étonner qu'une machine informatique apte aux problèmes combinatoires comme la "Mémoire Active" puisse y trouver de nombreuses applications.

Ainsi, elle pourra aider à choisir la meilleure combinaison d'odeurs afin d'obtenir un parfum de caractéristiques données, ou inversement à prévoir l'odeur du parfum résultant compte tenu des combinaisons de certains odorants connus. Ces démarches supposent évidemment l'instauration d'un code des messages olfactifs afin que puisse s'établir un dialogue convenable entre le compositeur et la machine.

### *3.55 - Aide à la création artistique*

Des artistes, épaulés par des techniciens de valeur ouverts aux préoccupations esthétiques, ont recherché dans quelle mesure la cybernétique pouvait permettre d'étudier et d'analyser, aussi bien les phénomènes qui se traduisent par ce que nous nommons "une émotion esthétique" que la motivation de l'artiste et le processus qu'il engage quand il réalise une oeuvre.

La méthode employée est celle de la simulation qui évite les déformations que l'introspection ou la rétrospective risquent d'apporter à l'image que se fait l'artiste réfléchissant sur son oeuvre, et sur lui-même, afin de tirer de la réflexion quelques enseignements sur les méandres de sa pensée et sur son comportement. L'artiste va réfléchir non sur l'oeuvre faite, mais sur l'oeuvre à faire en dressant un inventaire des actes à accomplir et en les classant dans l'ordre d'accomplissement. Le processus de fabrication de l'oeuvre étant décrit sous la forme d'une suite d'opérations simples, il va s'efforcer de concevoir une "machine" capable de réaliser chacune de ces opérations. Cette machine sera la simulatrice du travail qu'il aurait conçu. La comparaison de l'oeuvre produite par la simulatrice avec l'oeuvre que concevait l'artiste permettra de tirer de précieux enseignements pour la connaissance des mécanismes de la "création esthétique".

Selon Michel PHILIPPOT[1], le compositeur et le public peuvent être reliés par un réseau complexe de boucles d'action et de rétroaction que les machines peuvent aider à démêler. Ce réseau peut être représenté par un schéma simplifié (Voir fig. 3514a).

Un chemin relie le compositeur à l'oeuvre et l'oeuvre au public, tandis que dans le sens opposé l'oeuvre et les auditeurs sont séparément reliés au compositeur. Entre le compositeur et l'oeuvre en gestation, pourrait se trouver une machine A qui ne sera complète que si la vérification de la correspondance de l'oeuvre à la pensée du compositeur peut être faite par une autre machine B. Dans la pratique, la machine à "composer" est constituée par le couplage AB. Le rôle de ce mécanisme double peut être tenu par une seule machine dite à "manipuler l'information".

Entre l'oeuvre et l'auditeur se trouveront tous les moyens modernes de communication, musiciens, radio, enregistrement, reproduction, désignés sur la Fig. 3514a par C. Entre les compositeurs et le public agiront tout un ensemble D de mécanismes de contrôle, tant naturels qu'artificiels qui réagissent sur le compositeur : attitude du public lors des exécutions, relevés des droits d'auteur, sondages d'opinion, statistiques diverses, etc.

Dans l'observation du compositeur et des relations qu'il entretient avec son oeuvre, on distingue deux attitudes.

Dans la première, le compositeur prend en égale considération les mécanismes A et B, c'est-à-dire "que les règles d'assemblage des signaux sonores sont liés aux règles de vérification de choix, d'acceptation ou de refus de l'assemblage obtenu". Le compositeur s'efforce donc d'inventer des règles d'assemblage et de contrôle qui soient cohérentes entre elles et s'abstient d'agir sur le résultat.

Dans la deuxième attitude, le compositeur se réserve le droit de "court-circuiter" le mécanisme B. Il utilise alors A comme un "amplificateur d'intelligence", c'est-à-dire comme un mécanisme qui lui permet effectivement d'explorer un nombre considérable de possibilités, ce que ne lui aurait jamais permis le seul usage du crayon à papier. C'est à ce niveau qu'une structure "Mémoire Active" peut être une aide très précieuse.

Parmi les multiples combinaisons proposées par la machine au compositeur, il sera libre de choisir, d'apporter les retouches jugées utiles ; en bref de remodeler l'oeuvre qu'il avait primitivement conçue.

Dans tout ce qui précèse, nous n'avons pas considéré de discipline artistique particulière. Il est bien évident que les domaines de la musique et de la peinture pourraient être les premiers intéressés.

Des tentatives ont d'ailleurs été déjà réalisées par Ianis XENAKIS sur ordinateur, ainsi que par TINGUELY qui utilise déjà une machine à peindre. Prochainement, d'autres artistes utiliseront peut-être des structures "Mémoires Actives".

(1) Sous-directeur à la production artistique de l'O. R. T. F.

### 3.56 - *Aide à la prise de décisions*

Les "Mémoires Actives" simulent le déroulement sur une période de temps assez longue des phénomènes complexes économiques commerciaux ou d'emploi de forces en fonction d'hypothèses faites a priori. Les résultats de cette simulation fournis immédiatement permettent de balayer toutes les hypothèses possibles. Avec de telles structures, le dirigeant pourrait "dialoguer", jouer sur les hypothèses de base, prévenir les conséquences des options envisagées, et prendre une décision en toute connaissance de cause.

### 3.57 - *Applications diverses*

Les structures "Mémoires Actives" pourraient aussi s'appliquer :

- à la conduite automatique des grandes centrales énergétiques ainsi qu'à celles des machines exploratrices autonomes ; elles seraient à même de donner des ordres pour remédier au mieux à une avarie ;
- à l'organisation des nombreux paramètres d'une machine complexe pour en améliorer le rendement (consommation spécifique des turbomachines) ;
- organisation optimum des réseaux de transmission pour en améliorer l'exploitation ;
- définition des stratégies en temps réel dans les environnements dangereux impraticables à l'homme : guidage des travaux dans les fosses marines, dans les volcans, etc. ;
- élaboration de solutions du type mathématiques expérimentales au calcul des variations ;
- utilisation optimale des pipe-lines pour le transport des liquides.

## 3.6 - *PREMIERES REALISATIONS*

Suivant les principes "Mémoires Actives" que nous venons de voir, le Département Cybernétique de la SNECMA a réalisé pour différents organismes les applications suivantes :

- Direction des Recherches et Moyens d'Essais (Délégation Ministérielle à l'Armement) - Etude -

  Analyse d'une mémoire active et de ses applications.

- Direction Générale de la Recherche Scientifique et Technique - Etude -

  Résolution de problèmes d'ordonnancement grâce à un système comprenant une mémoire active. *Livrée le 20.12.1968.*

- NORMA (Groupe Nord-Aviation SNECMA) - Etude -

  Mémoire active pour l'ordonnancement des fabrications de programmes balistiques. *Livrée le 12.05.1967.*

- Centre National d'Etude des Télécommunications - Etude -

  Faisabilité d'une mémoire active adaptée aux problèmes de routage des circuits. *Livrée le 15.01.1968.*

- Préfecture de police - Matériel -

  Fourniture d'un ensemble électronique destiné à identifier les empreintes digitales (Dispositif dérivé des mémoires actives).*Livrée le 25.03.1968.*

- Département Régulation SNECMA - Etude et matériel -

  Dispositif élémentaire en vue d'une étude probatoire des possibilités de régulation optimale des turbo-machines à l'aide d'une mémoire active. *Livrée le 15.01.1968.*

- Laboratoire de recherche balistique et aérodynamique - Etude -

  Appareil pour la reconnaissance des constellations (Dispositif dérivé des mémoires actives). Etude en cours, dossier *livré le 19.05.1969.*

- Services techniques des télécommunications de l'air - Matériel -

  Lecture rapide des caractères. Reconnaissance des formes par une mémoire active - Fourniture d'une machine de laboratoire. *Livrée début 1971.*

- S.N.C.F. - Service de la Recherche -

  Mémoire active de laboratoire dite : "Simulateur de mouvements de trains" pour l'étude de problèmes combinatoires ferroviaires. *Livrée en octobre 1970.*

## 3.7 - Les PROBLEMES SPECIFIQUES de FLUIDIFICATION FERROVIAIRE

### 3.71 - Problèmes généraux

Un premier emploi des "Mémoires Actives" en trafic ferroviaire serait *une application tactique* qui consisterait en un traitement des problèmes au moment même où *l'action s'effectue*. En élargissant le domaine d'application, on peut évidemment songer à l'utilisation de ces machines *sur un plan stratégique* afin de combiner et de diriger un ensemble de moyens, ressources et dispositions en vue de la préparation et de la création optimales de systèmes.

Il est donc a priori possible d'envisager des applications :

- d'une part pour les études des installations d'itinéraire,
- d'autre part sur un plan opérationnel pour le réordonnancement des trains en régime perturbé.

Cela se traduirait en pratique par les possibilités suivantes :

a) augmentation du débit des réseaux ferrés ;

b) organisation optimum du trafic des wagons de marchandises pour en améliorer la productivité ;

c) problèmes d'affectation des locomotives aux trains ;

d) problèmes de rotation des équipes de conduite ;

e) élaboration des plans de transport des marchandises ;

f) problèmes d'organisation des réseaux.

### 3.72 - Quelques problèmes urgents d'organisation de réseaux

Ce sont ces problèmes essentiellement combinatoires posés par les circulations de véhicules guidés, qui ont fait l'objet de recherches de la part de la S.N.C.F. en vue de les formuler et de les adapter à une structure "Mémoire Active".

Il paraissait, en effet, d'un certain intérêt d'étudier une procédure originale établissant une correspondance bi-univoque entre cette nouvelle structure de machine et l'expression particulière de problèmes ferroviaires tels que :

a) une bifurcation simple ;

b) une configuration de voie unique avec évitements ;

c) l'affectation des quais d'une gare terminale ;

d) une configuration triangle (Gagny) ;

e) l'affectation de voies doubles à des batteries de trains (Paris - Juvisy) ;

f) gestion des "diagonaux" (tunnel sous la Manche).

### *3.73 - Terminologie*

L'évolution dans le temps des trains peut être ramenée à un enchaînement de "situations" distinctes décrites à chaque instant par l'ensemble de chaque valeur ou "état" des différentes variables mises en jeu. Une variable (un train, en général) évolue en une seule dimension dans le temps.

Par exemple, une certaine situation d'une gare sera décrite par l'occupation d'un certain quai pour le premier train, puis d'un autre quai pour un deuxième train, enfin d'une voie de garage par une rame en attente. A l'instant suivant, l'un au moins de ces mobiles ayant évolué, nous serons en présence d'une seconde situation. Le système est ainsi à trois dimensions, mais il est possible de prendre en plus, par exemple, l'évolution d'une locomotive, la position d'un aiguillage, l'état d'un signal, etc., et aboutir alors à un nombre n de variables indépendantes ou non. L'ensemble des situations successives sera représenté par une trajectoire dans cet espace "n dimensionnel".

Le mode de passage pour une variable d'un état à un autre état est réglé par ce que l'on a convenu d'appeler au chapitre II, "vecteur", et le fait d'exécuter un passage est une action.

Une variable évoluera donc d'état à état et par actions successives selon les règles portées par les vecteurs.

### *3.74 - Procédure de résolution des problèmes combinatoires de la circulation faisant intervenir une structure "mémoire active"*

Le problème consiste à faire correspondre aux variables, vecteurs et contraintes à mémoriser en machine, les paramètres propres à la circulation ferroviaire que sont itinéraires, vitesses, longueurs de convois, stationnements.

On peut, en première application, établir une correspondance entre variables et itinéraires. Il suffit alors de découper ces derniers en "segments" (Voir fig. 374a) à chacun desquels on fera correspondre une valeur de la variable, étant entendu que sur un tel itinéraire ainsi compris il ne pourra se trouver qu'un seul mobile.

Une situation complexe représentant des mobiles sur plusieurs itinéraires sera donc définie par l'ensemble des valeurs correspondantes (points dans l'espace n - dimensionnel précédemment défini).

Aux vecteurs attachés à ces valeurs, on a la possibilité de faire correspondre les *circonstances* de parcours (changement ou non d'itinéraire, vitesse de parcours, stationnements).

Il résulte physiquement de la position et de la vitesse des trains certaines contraintes d'espacement, de cisaillement, etc. que l'on traduira par des situations relatives entre variables (itinéraires) *incompatibles*. Ces situations incompatibles seront mémorisées dans la machine sous forme de points interdits dans les C.A.S. ou encore en n'attachant aux situations périphériques ceinturant ces zones interdites que les vecteurs en permettant le contournement.

On voit que les possibilités d'établissement de correspondances sont variées, surtout en ce qui concerne les "vecteurs - circonstances", et dépendent essentiellement du type de problème posé. Il semble que l'on se trouve dans la nécessité, pour travailler en mémoire active, de concevoir différentes modalités de prise en compte des données, de même qu'en technique ordinateur, il a été nécessaire d'élaborer des langages différents pour rendre plus commode son exploitation en différents domaines.

Au cours de l'analyse de fonctionnement du phénomène étudié, on établit la matrice des données et contraintes (fig. 374a). Cependant plusieurs hypothèses peuvent être faites concernant l'existence possible ou non de certaines situations selon que l'on raisonne statiquement ou dynamiquement. L'exemple de la bifurcation en talon (fig. 374a) illustre ceci.

Supposons pour l'instant des mobiles ponctuels se déplaçant sur deux itinéraires convergents A et B. Ces deux itinéraires seront les variables.

Selon que les mobiles seront supposés occuper les segments 1, 2 ... 5 de chacun des itinéraires, on donnera aux variables A et B les valeurs correspondantes 1, 2 ... 5.

Les matrices figurant les combinaisons possibles entre les deux variables sont construites de la manière suivante :

Supposons que chaque train demeure, au cours de sa progression, une unité de temps sur chaque segment de son itinéraire, chaque segment sera quantifié à une unité de temps.

Pour éliminer de ces matrices de combinaisons possibles les situations incompatibles, il suffit de désigner comme telles et en premier lieu celles qui conduiraient à faire occuper par les deux mobiles un même segment de la partie commune des deux itinéraires, c'est-à-dire que les situations :

$$\begin{array}{l} A = 3 \quad \text{et} \quad B = 3 \\ A = 4 \quad \text{et} \quad B = 4 \\ A = 5 \quad \text{et} \quad B = 5 \end{array} \qquad (I)$$

sont à interdire.

Nous voyons que ces considérations ne tiennent compte que de la position instantanée des mobiles ; si, par contre, on désire ne pas arrêter un des mobiles au droit de la convergence, supposant toujours qu'ils se déplacent à la même vitesse, on est conduit à éviter les situations :

$$\begin{array}{l} A = 1 \quad \text{et} \quad B = 1 \\ A = 2 \quad \text{et} \quad B = 2 \end{array} \qquad (II)$$

Nous qualifierons les contraintes du groupe (I) de statiques et celles du groupe (II) de dynamiques.

On peut également vouloir conserver un segment d'écart entre mobiles. Dans ces conditions, les combinaisons A = 1, B = 2, B = 1, A = 2, etc., sont des incompatibilités supplémentaires qu'il est commode d'inscrire de la même manière que les précédentes.

Processus opératoire

Reprenons la disposition précédente et donnée fig. 374a sous contraintes dynamiques. Soient $S_D$ (A, B) la situation de départ et $S_A$ (A, B) la situation d'arrivée.

On peut, pour ce problème à deux dimensions, exécuter manuellement la recherche de la trajectoire la plus courte dans le plan AB qui conduit de $S_D$ à $S_A$ en considérant possible le rebouclage permettant de passer pour chaque variable de sa valeur extrême, à sa valeur initiale.

Les "vecteurs" autorisés sont :

0, + 1 sur la variable A,

0, + 1 sur la variable B,

étant entendu que 0 signifie une autorisation d'arrêt et que + 1 signifie une autorisation d'avance. Prenons un exemple, une situation de départ quelconque : $S_D$ = 2, 3 et une situation d'arrivée voulue $S_A$ = 5, 4.

La trajectoire la plus courte s'effectue en six pas. On peut constater qu'il y en a plusieurs possibles dont trois ont été représentées sur la matrice fig. 374b.

La première en trait continu correspond au graphique fig. 374c.

La troisième en trait mixte correspond au graphique fig. 374d.

## *3.75 - Formulation du problème de voie unique avec évitements*

On considère une voie unique avec évitements $g_1$ et $g_2$ (voir fig. 375a) intercalés par trois segments de parcours I, II, III et on émet l'hypothèse que, pour des raisons de longueur, de tracé, de stationnements éventuels pour ces segments, les trains T1 et T2 qui les parcourent ont des marches différentes.

T1 respectera un itinéraire selon la gamme I, II, III avec stationnements en évitements imposés de 1 temps élémentaire, tandis que T2 suivra l'itinéraire inverse III, II, I avec attente imposée en $g_1$ de 1 temps et en $g_2$ de deux temps élémentaires. Ainsi, le diagramme des marches sera le suivant (fig. 375b).

Pour dresser la matrice des contraintes, on doit considérer qu'on ne peut avoir simultanément les trains T1 et T2 sur les mêmes segments I, II, III et tenir compte des temps d'occupation différents de ces segments selon les sens de circulation. Ces temps d'occupation seront donc portés sur les axes variables T1 et T2 dans l'ordre où ils seront réalisés par les mobiles et avec leur valeur comptée en "u.t." (unité de temps choisie).

On suppose que l'on doit déterminer le meilleur graphique de circulation, le critère en étant l'obtention du temps minimal séparant le premier départ de la dernière arrivée entre ces deux trains. Il ressort de cette donnée du problème que la situation de départ voit les deux mobiles à l'extérieur du système, comme d'ailleurs la situation d'arrivée. Ces deux situations sont repérées $S_D$ et $S_A$ sur la matrice des contraintes présentée ci-après en fig. 375c.

## *3.76 - Formulation du problème de gare terminale*

Le but du problème est de rechercher la combinaison optimale des mouvements de trains dans la configuration donnée par la fig. 376a.

Les variables seront dénommées Q1, Q2, Q3, Q4 dont les valeurs iront de 1 à 6 pour le sens pair et de 8 à 11 pour le sens impair. La valeur 12 représente un réservoir infini correspondant en fait à la ligne en amont de la gare, et la valeur 7 représente la position à quai.

L'ensemble de la configuration étant supposé s'étendre sur 600 m, chaque segment de valeur a donc pour longueur 100 m environ, sauf le segment 7. Les trains de leur côté ayant une longueur avoisinant 200 m, on voit qu'un train occupera simultanément au moins deux segments et trois au plus.

On ne considérera, pour l'étude sur mémoire active, que la progression de la *tête du train* et l'on établira les contraintes en conséquence.

Ceci explique que le segment 7 ait une longueur double puisque, dès l'instant où les trains doivent repartir en sens inverse, la tête change de bout et le segment 7 devient origine.

Dans la configuration de tare terminale étudiée, tous les itinéraires de segments 3 et 4 (8 et 9) sont banalisés et empruntables au choix ; ainsi, les trains à destination des quais 3 et 2 peuvent indifféremment circuler par les points a et b. Il en est de même pour leur sortie.

## *3.77 - Formulation d'un problème de configuration de triangle*

### 3.771 - Exposé des données

Poursuivant les mêmes buts que l'étude de la gare terminale, le premier problème à résoudre est de réaliser, sous la meilleure forme, une relation bi-univoque Système-Physique - Système-Mémoire en vue de pouvoir entrer sur une structure "mémoire active" des données adaptées (situations, vecteurs).

Ce triangle ferroviaire est donné par la fig. 377a où des voies bidirectionnelles sont reliées à chaque sommet.

Le problème est de déterminer le meilleur ordre de passage des trains sur le triangle afin que l'occupation des infrastructures en temps soit minimum.Ce problème sera étudié plus en détail aux chapitres IV et VI.

## 3.8 - CONCLUSIONS

Cette liste des applications que nous venons de voir n'est pas exhaustive ; la poursuite des études permettra de trouver d'autres applications à cette invention (stratégie économique, traduction automatique, temps partagé des ordinateurs, réanimation de grands blessés).

Il sera possible d'appliquer cette technique dans la conduite des systèmes quand l'automatisme classique sera défaillant parce que des choix seront nécessaires et que le facteur humain ne pourra intervenir du fait de sa lenteur de réaction et de la faible quantité d'informations qu'il est capable de considérer simultanément.

L'exploitation des mémoires actives permettrait par une simulation très rapide de phénomènes complexes :

- d'augmenter la rentabilité d'une infrastructure existante grâce à un meilleur emploi des moyens ;
- d'éviter ainsi des investissements inutiles ;
- de choisir, en affichant dans la mémoire des moyens nouveaux, les investissements les moins coûteux pour atteindre un objectif déterminé ;
- de trouver la meilleure stratégie à adopter en cas d'événements fortuits (absence de personnel, avarie de machine, série de pièces défectueuses, contraintes nouvelles dues à un accident, etc.).

La mémoire active est un moyen d'information et de prévision permettant au commandement de choisir parmi toutes les solutions possibles la plus efficace.

Elle devrait donc essentiellement se placer sur le marché des machines d'ordonnancement. Or, c'est un marché considérable si l'on songe qu'actuellement dans le monde, le chiffre d'affaires de l'informatique appliquée à ces problèmes est de 50 milliards de francs et qu'on estime qu'il passera à 500 milliards avant dix ans.

Dans le cadre plus restreint des applications ferroviaires,les exercices exposés dans les paragraphes précédents, ont permis à la S.N.C.F. d'examiner sur le prototype "M2" du Docteur SAUVAN certaines des propriétés intéressantes, de la mémoire active et, parallèlement, les problèmes rencontrés lors de sa mise en oeuvre.

En particulier, il a été fait appel au caractère qui fait l'originalité de cette machine, à savoir qu'elle peut construire une solution optimale à partir de données de base et de contraintes mémorisées, à la différence de l'ordinateur qui ne peut que reproduire le processus logique programmé par son analyste.

Cette propriété d'optimalisation mise en avant par son inventeur avait pu être vérifiée sur des cas simples dont le critère d'optimum est l'obtention du maximum de circulation en un minimum de temps, compte tenu ou non des délais d'acheminement minimaux et de priorités entre trains.

Dans ces exercices, la machine expérimentale M2, bien qu'elle n'ait pas été à l'origine conçue pour l'usage qui en a été fait par la S.N.C.F., n'a pu être mise en défaut, soit sur un non respect des contraintes, ce qui est essentiel, soit sur des solutions aberrantes malgré quelques points faux inscrits dans un C.A.S. en dérangement.

En ce qui concerne les applications possibles de ce simulateur qu'est la mémoire active, il est convenable de distinguer :

- l'outil de simulation *stratégique* (à employer, par exemple, pour l'optimisation d'un réseau de triage, de la configuration d'un terminus, etc.) relevant d'une machine plus ou moins universelle, éventuellement utilisable en "service-bureau" et permettant de créer un système donné, de façon optimale ;
- l'outil de simulation *tactique* intégré ou non à un organe de commande et où tout le câblage est spécifique au problème étudié, utilisé en cas de perturbation pour en minimiser les conséquences.

Dans le second cas, la machine peut proposer des solutions en "temps réel" et sans programmation préalable, moyennant la mise en mémoire une fois pour toutes des contraintes. Les informations en provenance du terrain devraient naturellement lui être injectées de manière directe et automatique tandis que les questions ou ordres transmis par l'opérateur le seraient par l'intermédiaire d'un pupitre de commande.

En considération de ces possibilités, la S.N.C.F. a confié à la SNECMA la construction d'une mémoire active de laboratoire spécifiquement destinée à l'étude des problèmes ferroviaires et qui fera l'objet du chapitre IV.

Un tel outil à caractère opérationnel bénéficierait en outre des avantages inhérents à la structuration particulière de la mémoire active. La faible probabilité d'erreur à laquelle est sujette cette machine lui donne un atout particulièrement appréciable dans les applications industrielles de la Cybernétique.

# L I V R E  II

APPLICATION des PRINCIPES "MEMOIRE ACTIVE"
à un COMBINATEUR ELECTRONIQUE EXPERIMENTAL pour la S.N.C.F.

# CHAPITRE 4

## Le combinateur électronique expérimental de la S.N.C.F.

## 4.1 - GENERALITES

Le prototype de combinateur électronique réalisé et faisant l'objet de la présente thèse est basé sur le principe de la structure logique dite "Mémoire Active" élaborée au chapitre II. Ce combinateur est une machine informatique destinée à résoudre en temps réel les problèmes extrêmement complexes d'ordonnancement et en particulier ceux qui se rapportent à la détermination des stratégies ferroviaires.

Etant donné son principe, il procède différemment des ordinateurs classiques qui sont pratiquement réduits à examiner successivement toutes les combinaisons d'ordonnancement possibles au prix d'un volume de mémoire et d'un temps de calcul prohibitifs.

En fait la structure "Mémoire Active" permet d'enregistrer, comme on l'a vu, les données caractéristiques d'un certain nombre d'expériences. A partir de ces données, elle élabore un processus d'association entre deux états distincts inscrits dans sa mémoire. Chacun de ces états constitue la description d'une situation réelle reconnue comme situation initiale et situation finale, même si ces deux états n'avaient pas été rapprochés dans une expérience antérieure.

Une situation peut être définie par la valeur instantanée de n paramètres, celle-ci pouvant être représentée par un vecteur à n composantes dans un espace n dimensionnel.

Une situation donnée peut elle-même conduire à p autre situations par l'intermédiaire de pas, résultat de la combinaison des actions des n composantes du vecteur d'état. Ces nouvelles situations intermédiaires seront représentées par p vecteurs issus du point représentatif de la situation "origine".

Etant donné dans un espace n dimensionnel, une situation origine ou situation de départ SD, on se propose d'atteindre une situation but ou situation d'arrivée SA. La machine s'efforce de déterminer le trajet le plus court ou trajet optimal (ce qui correspond au nombre de pas minimal), pour passer de SD à SA en se servant des situations et des actions qu'elle a déjà enregistrées. Cette recherche tient naturellement compte des zones d'incompatibilités ou "contraintes" susceptibles d'intervenir tout au long du trajet.

De par son principe, basé essentiellement sur l'analyse parallèle, cette mémoire active peut fonctionner en temps réel car elle travaille beaucoup plus rapidement qu'un ordinateur. Aussi pourra-t-elle constituer un outil puissant et complémentaire de l'ordinateur traditionnel, pour résoudre les problèmes de type hautement combinatoires.

Cette "Mémoire Active" est dite "synthétique", car elle est capable d'associer un grand nombre de valeurs au moyen d'un petit nombre d'éléments de mémoire.

Elle est aussi expérimentale dans la mesure où elle peut enregistrer le résultat d'une expérience, c'est-à-dire le passage de la valeur d'un paramètre à une autre valeur de ce paramètre.

Elle est active c'est-à-dire évolutive, en ce sens que tout état nouveau peut y être enregistré à partir de l'état actuel et qu'une interrogation quelconque tient compte immédiatement de ce nouvel état qui peut être lui même modifié en cours d'opération.

Elle travaille de façon "synoptique" puisque l'interrogation se fait en parallèle et simultanément sur toutes les voies possibles.

Le fonctionnement de la mémoire est contrôlé par une logique de commande qui permet de connaître en permanence l'état de la mémoire, d'effectuer des enregistrements de situations, d'organiser une hiérarchie, de définir des priorités et d'en extraire les donénes voulues.

## 4.2 - *POSITION du COMBINATEUR EXPERIMENTAL (voir organigramme 4.2)*

## 4.3 - CARACTERISTIQUES de BASE RETENUES pour la CONCEPTION

### 4.31 - Définition d'un problème réel et du temps de traitement

Nous avons vu au chapitre précédent quelles étaient la nature et l'ampleur des problèmes d'ordonnancement du trafic ferroviaire.

Dans le cas présent, il a semblé que le problème pratique connu sous le nom de "Triangle de Gagny" était le plus urgent et aussi techniquement le plus vaste, susceptible de contenir beaucoup d'autres problèmes de fluidification du trafic mais de dimension inférieure (voie unique, gare terminale, divergence simple, convergence simple, cisaillement etc...).

Ce problème a donc servi de base pour définir l'enveloppe des caractéristiques que posséderait la machine. A la lumière d'exercices ferroviaires simples traités sur la machine M2 du Docteur SAUVAN, il semblait possible de réaliser pour un coût modéré un appareil qui satisfasse notre "quintuplet d'hypothèses de base", soit adapté à une série de problèmes concrets et soit surtout, capable de travailler en temps réel.

Pour les problèmes qui nous préoccupent, nous considérons qu'un délai d'environ une minute et demie pourra s'écouler entre la date d'acquisition des entrées (données venant du terrain par un système quelconque de communication radio ou filaire et fournissant les caractéristiques de nature, destination, tonnage, vitesse, position, longueur des trains) et la date d'émission d'une réponse sur les systèmes cybernétiques redonnant les actions nouvelles que ces trains doivent engager (accélération, ralentissement, arrêt etc...).

A l'heure actuelle, ces indications de conduite sont émises par le système de signalisation par feux, flèches, tableaux indicateurs lumineux. Des expériences sont en cours pour communiquer directement par radio avec le pilote du train afin de lui donner les indications d'actions nouvelles à engager. Un système de signalisation resterait naturellement en place pour assurer les conditions de sécurité des circulations.

On voit donc que de toutes manières, des retards $\tau$ et $\tau'$ interviennent respectivement pour la transmission des informations et des ordres et que l'organe qui les traite devra donner une réponse en moins de 1' 30" - $(\tau + \tau')$ - (voir fig. 431a).

En conséquence, nous avons considéré que la machine, bien qu'étant un appareil de laboratoire, devait travailler dans des temps inférieurs à une minute, si l'on voulait qu'elle soit capable de représenter la réalité et qu'elle constitue par suite une base d'étude saine permettant de définir des machines opérationnelles.

## 4.32 - Définition du "problème enveloppe" : le triangle de GAGNY

A) Considération géographique

Le noeud ferroviaire de Gagny permet de relier au point de vue trafic marchandises les régions S.N.C.F. du Nord, de l'Est et du Sud-Est.

Il est formé, ainsi que le montre la figure 432a, par trois lignes bidirectionnelles reliées par "triangle double", ce qui permet toutes les combinaisons possibles de destinations à partir de l'une quelconque des lignes raccordées à chaque sommet du triangle.

Autrement dit, chacune des trois régions (par l'intermédiaire de triages) peut émettre des trains vers n'importe quelle autre et réciproquement, en recevoir de chacune d'elles.

Ces conditions conduisent à la possibilité de former six itinéraires[1] que nous avons repérés comme suit :

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Itinéraire | I | Nord | Est | (I N - E) |
| " | II | Nord | Sud | (II N - S) |
| " | III | Sud | Est | (III S - E) |
| " | IV | Sud | Nord | (IV S - N) |
| " | V | Est | Nord | (V E - N) |
| " | VI | Est | Sud | (VI E - S) |

L'ensemble de cette configuration étant plane (aucune voie n'utilisant de "saut de mouton" lorsqu'elle en intercepte une autre), il en résulte des zones de conflits de quatre types :

- conflits type convergence (Cg1, Cg2, Cg3) qui existent lorsque deux voies convergent sur une seule ;
- conflits type divergence (Dg1, Dg2, Dg3) lorsqu'une voie se divise, "diverge" en deux autres ;
- conflits type cisaillement (Cs1, Cs2, Cs3) lorsque deux voies se coupent, "se cisaillent" ;

(il est bien évident que dans chacun de ces trois cas, deux trains ne peuvent passer en même temps au point du conflit)

- conflits type succession (Ss) de trains qui se succèdent sur le même itinéraire.

Cette première analyse montre que chaque itinéraire est en conflit au minimum avec l'un des cinq autres. Il en résulte qu'une machine devant prendre en compte une telle configuration devait être capable de représenter l'évolution des trains sur six itinéraires différents et susceptibles de présenter entre eux des segments d'incompatibilité (matérialisation des conflits).

(1) On appelle "itinéraire" un des chemins que peut suivre un train entre un point "origine" et un point "destination". En général pour passer d'un point A à un point B distinct de A, dans un réseau ferré, on peut choisir entre plusieurs chemins. On dira qu'il existe plusieurs itinéraires possibles pour aller de A à B.

B) Considération de trafic

Selon la segmentation des itinéraires et la nature des trains, il est admis que la vitesse de ces derniers peut varier entre 40 km/h (zone d'aiguillage, ralentissement pour travaux, etc...) et 80 km/h (voie normale) et qu'ils peuvent se classer en trois catégories différentes. Chaque catégorie doit intégrer la nature du train (locomotive seule, train messageries, train marchandises), sa vitesse maximum réglementaire (80 km/h, 70 km/h, 60 km/h) et sa longueur (20 m, 400 m, 600 m).

Les analyses statistiques du trafic sur le triangle de Gagny ont montré :

1) que les densités de circulation étaient proportionnelles aux nombres 4, 2 et 1 respectivement sur les branches (Nord-Sud, Sud-Nord), (Est-Sud, Sud-Est), (Est-Nord, Nord-Est) - voir fig. 432b - ;

2) que la date d'entrée des trains sur le triangle pouvait être considérée comme une variable aléatoire ;

3) que le trafic transité par Gagny dépendait de l'heure de la journée et du jour de la semaine (voir fig. 432c) ;

4) qu'en conséquence, il existait des heures de pointe pendant lesquelles, avec les moyens actuels, il se produit une saturation du trafic conduisant à des arrêts et des retards pour un certain nombre de trains (voir fig. 432d1, 432d2 et 432e) ;

5) que pour minimiser le coût économique des retards cumulés des trains, il fallait éviter d'arrêter les trains marchandises très lourds, en particulier ceux de la branche Est-Nord (forte perte d'énergie au freinage et de temps au démarrage) ;

6) enfin, qu'il existait une corrélation entre le nombre de mouvements passés sur le triangle de Gagny et le trafic global marchandises de la S.N.C.F. (voir fig. 432f).

C) Enoncé du problème

Compte tenu des considérations précédentes et du fait qu'actuellement la régulation du trafic sur le triangle est opérée par l'homme, il convenait d'augmenter au niveau le plus élevé possible et par une automatisation poussée, le nombre de trains à faire passer pendant les heures de pointe.

L'exploitation de cette bifurcation ne devant constituer ni une gêne ni une sujétion pour les gares environnantes, il en résulte qu'on peut se baser sur trois critères pouvant d'ailleurs être contradictoires :

- maximum de débit,
- minimum de gêne,
- minimum de coût.

## *4.33 - Définition du type de structure*

### 4.331 - Choix du paramètre à minimiser

Nous venons de voir que les critères de base retenus (maximum de débit et minimum de coût) pouvaient être contradictoires. En effet, il est possible de prévoir une fluidification du trafic à temps minimum et une autre fluidification à coût minimum.

Ces deux types de fluidification concordent exactement lorsque les variables (les trains) entrant en ligne de compte ont la même valeur (nous dirons le même poids) les unes par rapport aux autres.

Dans la réalité, c'est rarement le cas. En effet le retard t (en minutes par exemple) d'une locomotive seule n'a pas la même valeur économique qu'un même retard t portant sur un train du régime accéléré qui transporte des primeurs ou sur un train voyageur dit "noble" style Mistral ou Capitole. La "minute de retard" n'a donc pas le même coût de pénalité suivant la nature du train.

Or lorsqu'un train de poids fort entre en conflit avec un de poids faible, il peut y avoir intérêt économiquement à donner la priorité de passage au premier, même si cette solution coûte plus cher "en temps de retard" que celle qui consistait à faire passer d'abord le second. C'est le cas où les critères de coût et débit sont contradictoires.

Afin de gérer au mieux un réseau ferré, il nous a semblé plus intéressant de retenir en priorité le critère du temps, ceci pour plusieurs raisons :

- en première approche, il paraissait plus simple de concevoir une machine qui minimise le temps, étant donné qu'on pouvait relier facilement et directement le temps réel d'évolution d'une variable à un temps fictif de traitement sur machine, indiqué par une horloge électronique ;
- sur le plan théorique, il paraissait souhaitable de disposer d'un outil capable de donner les meilleurs ordonnancements possibles (en temps) des "marches de trains", ceci dans l'optique d'établir des programmes de marche théorique ;
- enfin il paraissait toujours possible de corriger un ordonnancement en temps minimum par l'introduction de la notion de "variable prioritaire" et même d'établir un dosage de cette priorité. Cette notion permettait de toutes manières de faire passer à coup sûr le train de poids fort avant le train de poids faible.

Bref, avec un critère de temps minimum, il semblait facile de se rapprocher par des corrections (introduites par la notion de priorité) du critère de coût minimum.

4.332 - Choix de la structure

Du fait des incompatibilités entre les trains qui sont uniques et homogènes (en règle générale, un train i entre en conflit une fois et une seule avec un autre j), il est apparu que la structure "Mémoire Active" basée sur un fonctionnement en inscription négative pouvait convenir.

Dans ce mode de fonctionnement, il suffit de repérer les zones d'inhibitions (les contraintes), le reste de l'espace autorisant l'élaboration d'une solution.

Par exemple (voir fig. 433a), on peut représenter facilement un conflit de cisaillement (Cs) entre deux trains T1 et T2 dans un système de coordonnées où chaque axe représente la progression en espace du train qu'il porte. Il est bien entendu que la marche de ces deux trains est conditionnée par la même référence : le temps.

*4.34 - Définitions des paramètres de base*

4.341 - Choix du nombre de variables

Les courbes de densité de circulation du paragraphe 4.32 montraient qu'on pouvait atteindre avec certaines gênes, 18 trains/heure. En se basant pratiquement sur l'augmentation de 30 % permise par l'automatisation, on peut espérer atteindre des densités de 24 à 25 trains/heure sur le triangle.

S'il s'avère nécessaire de redonner des ordres aux trains avant qu'ils ne pénètrent sur les zones de conflits, il faut être capable de les prendre suffisamment tôt dans le système automatique.

On estime qu'en moyenne il faudrait les considérer à 7 km en amont de chaque sommet du triangle (voir fig. 434a). Il faut ensuite les suivre pendant leur passage sur le triangle et un certain temps après leur sortie, sur 3 km environ.

Il est donc indispensable de prendre en compte 10 km de voie pour chaque itinéraire à partir des points d'injection A, D, F. En considérant, compte tenu de tronçons à vitesse réduite (40 km/h), que la vitesse moyenne des trains sur ces 10 km est de 50 km/h, il faut compter 12 minutes de trajet, plus éventuellement un retard moyen de trois minutes (par suite de gênes) à l'entrée du triangle. En définitive, le temps moyen de parcours est de 15 minutes.

Dans l'hypothèse d'une densité de circulation de 25 trains/heure, on peut dire qu'il y aurait en moyenne sept trains sur le configuration par tranche de 15 minutes. Ce serait le nombre maximum de trains qui pourrait être compté si une photographie était prise à une date t. Ces calculs préliminaires nous ont conduit à adopter huit variables en première étape.

Cependant si on veut étudier la capacité maximale du triangle moyennant certaines gênes, il est possible d'envisager une cadence théorique d'arrivée de 30 trains/heure. L'extrapolation des relevés statistiques montre qu'avec une distribution gaussienne des arrivées, on peut atteindre (moyennant les retards occasionnés par ce nombre de 30 trains/heure) des temps de parcours de 25 minutes. Cette hypothèse entraînerait alors la présence simultanée de 12 à 13 trains sur la configuration précédemment envisagée. Comme les statistiques montrent que les densités de circulations sur les trois branches sont comme les chiffres 4, 2 et 1, nous avons estimé que 14 variables $\boxed{2\ (4 + 2 + 1)}$ seraient nécessaires pour analyser cette nouvelle situation.

4.342 - Choix des vecteurs d'action

Dans le chapitre II, nous avons vu qu'il était question de passer d'une situation de départ SD à une situation d'arrivée SA par des vecteurs d'action :

$Dx1, Dx2, \ldots Dxn$

avec $Dx1 \neq Dx2 \neq \ldots \neq Dxn$

et $Dy1 \neq Dy2 \neq \ldots \neq Dyn$

les quantités Dx1, Dy1 étant entières mais positives ou négatives.

Dans le cas de la circulation ferroviaire, il est admis que les trains progressent toujours sur leur itinéraire. Les vecteurs d'action négatifs se trouvent donc exclus. De plus, il n'y avait aucun empêchement à choisir $Dx1 = Dx2 = \ldots Dxn = Dy1 = Dyn = 1$ et $Dxo = Dyo = \ldots Dzo = 0$, puisqu'on fonctionne en inscription négative et que les trains avancent de façon continue sur leur itinéraire et non pas en "saut de puce".

Ainsi on peut définir deux vecteurs élémentaires d'action 0, ou 1, pour toutes les variables, quel que soit leur état.

Nous appellerons ces vecteurs élémentaires "actions" et nous dirons qu'une variable "fait l'action 0" si elle stationne ou "fait l'action 1" si elle progresse d'un "pas" sur son axe.

4.343 - Choix du module de segmentation des itinéraires

L'analyse des différents itinéraires montre que pour dix km de voie, on rencontre en moyenne dix segments fonctionnels de signalisation appelés "cantons". Sur les branches du triangle qui ne mesurent que 300 m, il existe deux ou trois zones assurant des fonctions de signalisation avec d'autres itinéraires. De plus à l'entrée de chaque sommet du triangle, il existe une ou deux zones supplémentaires, dites "zones d'approche", qui possèdent aussi des fonctions de signalisation et de formation d'itinéraires.

En conséquence, pour prendre en compte un itinéraire de dix km franchissant le triangle, il a semblé qu'en moyenne $10 + 2 + 2 = 14$ segments seraient nécessaires et suffisants. Le module de segmentation des itinéraires adopté est donc de 14.

4.344 - Définition du poids maximum d'un canton

Le poids du canton est représentatif de la vitesse du train sur ce canton. Les cantons étant de longueur variable et la vitesse des trains étant également variable, il en résulte que la définition du poids maximum (Pm) susceptible d'être affecté à un canton résulte du compromis entre le temps de passage d'un train lent sur un canton long et du temps de passage d'un train rapide sur un canton court.

L'analyse de la longueur des cantons montre qu'elle se situe entre 90 et 1 400 m. La vitesse des trains peut varier entre 40 et 80 km/h.

Temps de parcours (t1) d'un canton de 1 400 m par un train circulant à 40 km/h :

$$t1 = 1\,400 \times \frac{3\,600}{40\,000} = 126 \text{ s}$$

Temps de parcours d'un canton de 90 m par un train circulant à 80 km/h :

$$t2 = 90 \times \frac{3\,600}{80\,000} = 4,1 \text{ s}$$

Pondération maximale :

$$Pm = \frac{t1}{t2} = \frac{126}{4,1} = 30,8$$

Le poids à affecter à un canton devant être un nombre entier, nous avons choisi $\underline{Pm = 31}$.

Il faut noter qu'en plus cette valeur est tout à fait correcte pour se coder en binaire :

$$31 = 2^5 - 1.$$

4.345 - Définition du nombre de "catégories de vitesse" par itinéraire

Nous avons vu au paragraphe 4.32 que plusieurs trains de nature différente pouvaient se succéder sur un même itinéraire. Il convient, pour tenir compte de cette situation, de pondérer les cantons en fonction de la vitesse de chaque train.

Deux possibilités sont offertes :

I ) Réaliser la pondération pour le premier train de la série et modifier ensuite cette pondération chaque fois qu'un autre train de vitesse différente passera sur cet itinéraire.

Cette méthode semble délicate à mettre en oeuvre car il faudrait interrompre le fonctionnement de la machine entre le traitement des trains i et j pour réaliser la pondération du train j.

II) Diviser chaque itinéraire en plusieurs <u>sous-itinéraires</u> pouvant être pondérés indépendamment les uns des autres. Il ne reste plus qu'à affecter chacun des trains qui se suivent à un des "sous-itinéraires". C'est cette solution qui a été retenue.

L'examen des catégories de trains montre qu'ils peuvent se classer en trois catégories :

a) trains marchandises lourds et longs du régime ordinaire (R.O.),

b) trains messageries du régime accéléré (R.A.),

c) locomotive seule, dite "haut le pied" (H.L.P.).

Ces considérations ont conduit à retenir trois catégories de vitesse par itinéraire que l'on conviendra d'appeler : marche 1, marche 2 et marche 3.

4.346 - Evaluation de la puissance combinatoire

- A huit variables

• Nombre de situations représentables :

une variable peut se trouver dans 434 états (14 x 31). Avec huit variables on peut donc représenter $(434)^8$ situations possibles.

$$Ns = (434)^8$$

$$\log Ns = 8 \log 434 = 8 (2 + \log 4,34)$$

$$= 8 (2 + 0,638) = 8 (2,638)$$

$$\log Ns = 21,104$$

$$\boxed{Ns_8 = 1,27\ 10^{21} \text{ situations possibles}}$$

• Nombre de vecteurs résultants élémentaires (vecteurs $\vec{\gamma}$) :

chaque variable pouvant donner la composante 0 ou 1, il existe $2^8$ vecteurs $\vec{\gamma}$ possibles, soit 256 pas $\gamma$ possibles à partir d'une situation de départ $S_D$.

$$\boxed{N_{\gamma 8} = 256}$$

• Nombre maximum de stratégies envisageables pour un problème à huit variables affichées au départ :

1) jusqu'à ce que la première variable soit routée

$$N_1 = 256 \times 434$$

2) jusqu'à ce que la deuxième variable soit routée

$$N_2 = 128 \times 434$$

Finalement $N = 434 (256 + 128 + 64 + 32 + 16 + 8 + 4 + 2)$

$$N_{st} = 434 \times 510$$

$$\boxed{N_{st8} = 221\ 340 \text{ stratégies possibles}}$$

Cela constitue une séquence de 221 340 actes coordonnés différents. (Ce qui correspond aux trajets possibles ne repassant jamais deux fois par le même point).

- A quatorze variables

- $N_{s14} = 14 \times 2,528 = 37$

$N_{s14} = 10^{37}$ situations possibles

- $N_{\gamma 14} = 2^{14} = 14 \log 2 = 14 \times 0,30 = 4,2$

$N_{\gamma 14} = 1,58.10^{4}$ vecteurs $\vec{\gamma}$ élémentaires

- $N_{st} = 434\ (2^{1}_{14} + 2^{2} + 2^{3}_{1} + 2^{4} \ldots + 2^{14})$

$$N_{st} = 434\ \frac{2 - 1}{1}$$

$$N_{st} = 434 \times 1,58.10^{4}$$

$N_{st_{14}} = 6,9 \times 10^{6}$ stratégies envisageables ou chemins

Définition :

On conviendra d'appeler puissance combinatoire (notée Pci)(1) d'une machine combinatoire le nombre théorique maximal de stratégies (ou chemins) distinctes que cette machine peut entreprendre au cours d'un traitement n'utilisant qu'une seule fois jusqu'à son routage complet chacune de ses variables.

Application : $Pc8 = 221\ 340$

$Pc14 = 6,9 \times 10^{6}$

Il va de soi que cette notion de puissance combinatoire est une caractéristique fondamentale d'un combinateur permettant de juger du volume de ses possibilités combinatoires.

La puissance combinatoire étant en principe un nombre très grand, il serait intéressant de définir une unité que l'on conviendra d'appeler le "Méga-chemin" noté Mch (1 Mch = $10^{6}$ chemins).

Avec ces nouvelles notations nous aurions :

$Pc8 = 0,22$ Mch

$Pc14 = 6,9$ Mch

*Remarque :*

On conçoit l'importance des possibilités combinatoires d'une telle machine si l'on songe que l'homme ne peut guère prévoir plus de dix actes coordonnés.

(1) L'indice i indiquant le nombre maximal de variables distinctes susceptibles d'être utilisées.

### 4.35 - *Définition des Centres*

Une étude fonctionnelle inspirée des considérations du chapitre II, et réalisée au paragraphe 4.5, montre qu'il faut définir les organes suivants :

1) un centre d'association de situations C.A.S., analogue au C.A.S. vu au chapitre II ;

2) un centre de vérification de cohérence C.V.C., voisin du C.A.A. vu au chapitre II ;

3) un centre de coordination composé :
   - du centre timing,
   - du centre de sélection (qui assure l'aiguillage des opérations) ;

4) un centre de mémorisation, constitué de deux sous-ensembles :
   - le centre de validation d'action, C.V.A.,
   - le centre module-train ;

5) des centres de hiérarchisation et de priorité ;

6) des centres de liaisons assurant l'interface entre les centres vitaux (C.A.S., C.V.C., C.V.A.) et les entrées-sorties.

Ces centres doivent être de structure modulaire afin de prendre en compte dans une première phase huit variables et dans une seconde phase quatorze. Aussi il a semblé intéressant de les réaliser en circuits intégrés fixés sur des cartes standard, et interchangeables.

Cette disposition se révèle particulièrement avantageuse pour la mise au point et les dépannages.

Ces centres devaient donc être réalisés dans la double optique de la modularité et de la maintenance.

### 4.36 - *Définition des Entrées - Sorties*

La machine ayant avant tout un but expérimental, nous avons voulu nous affranchir de systèmes périphériques, certes élaborés mais sujets à des défauts de fiabilité, afin de porter essentiellement notre attention sur le principe "Mémoire Active" adapté à un problème réel. Ceci explique le choix d'un affichage manuel[1] par matrices, fiches et interrupteurs, pour l'ensemble des entrées ainsi que celui d'un organe de réponse fiable, par une machine électrique classique[2] qui puisse représenter sur un diagramme le graphique de progression des trains en fonction du temps.

(1) Il est bien évident qu'à ce mode d'entrée rudimentaire peut se substituer un procédé beaucoup plus évolué consistant par exemple en une gestion des entrées par un ordinateur.

(2) Il est aussi possible d'envisager tous les périphériques modernes de sortie (imprimante, ruban, bande, table traçante, console de visualisation etc...).

Ces deux problèmes des entrées-sorties feront l'objet du paragraphe spécial (7.2) intitulé "Couplage avec un ordinateur".

### *4.37 - Définition du dialogue homme-machine*

Cette machine, répétons-le, étant un appareil de laboratoire, il a paru indispensable d'avoir le maximum de points d'accès afin de procéder facilement aux investigations. De même, il fallait une grande souplesse dans le pilotage. Ceci a conduit à réaliser un panneau de commande par clavier (système piano) qui soit robuste (du fait des nombreuses interventions manuelles) et qui permettent beaucoup de combinaisons.

De plus, il a fallu renseigner au maximum l'opérateur sur la prise en compte des actions qu'il entreprend par plusieurs rangées de voyants qui s'allument seulement en "retour-logique", c'est-à-dire lorsqu'on est certain que la machine a bien pris en compte "logiquement" la nouvelle action demandée.

Avec la machine sous sa forme actuelle, l'opérateur peut faire évaluer un problème de trois manières :

1) en "routage"(1) global. La machine traite automatiquement le problème sans intervention de l'homme jusqu'à ce que la dernière varialbe (ou train) ait quitté la configuration prise en compte ;

2) en "arrêt train routé". Le problème évolue automatiquement jusqu'à la première sortie d'une variable de la configuration examinée ;

3) en "routage limité". Il y a la possibilité de faire évoluer le problème pendant un certain nombre m de pas (nombre m variable de 1 à 999, dont la valeur est laissée à la discrétion de l'opérateur par voie d'affichage manuel sur roues codeuses). Avec une configuration ferroviaire, on minimise le temps. Il est donc possible de faire évoluer un problème pendant une durée limitée arbitrairement.

La souplesse d'exploitation indiquée plus haut se concrétise par le fait qu'une variable sortie de la configuration prise en compte peut être réinjectée en cours de problème pour simuler l'arrivée d'une autre variable (nouveau train atteignant la zone explorée par la machine par exemple). De même en cours de problème, on peut éliminer artificiellement une variable jugée inintéressante.

Il est de même possible de traiter globalement un problème sans solliciter la machine à écrire. Un système de mémoire additionne les temps élémentaires, ce résultat cumulé est disponible une fois le problème terminé. Ce mode de travail indique le "module" de la stratégie employée sans fournir le détail des choix qui ont été faits par la machine pour y aboutir.

(1) Le terme "routage" est employé pour représenter la marche ou la progression d'un train suivant un itinéraire, c'est-à-dire sa route.

*Nota :*

Nous reviendrons ultérieurement plus en détail sur les organes de dialogue.

### *4.38 - Définition de la technologie*

Pour les mêmes raisons que précédemment, nous avons voulu nous affranchir des technologies de pointe et encore sujettes aux maladies de jeunesse. Cela justifie notre choix de technologies fiables et ayant fait leurs preuves telles que Diode Transistor Logic (D.T.L.), de Motorola et Diode Transistor Micrologic (D.T.µ.L.), de S.G.S. Fairchild.

De plus la possibilité de travailler à des fréquences de 1 ou 2 MHz semblait compatible[1] avec l'objectif de temps réel d'une minute signalé au par. 4.31.

(1) La justification en sera donnée au paragraphe 4.7122 (évaluation du temps de calcul).

## 4.4 - CAHIER des CHARGES

### 4.41 - Nature du dispositif

#### 4.411 - Propriétés utilisées de la Mémoire Active

- Description de trajectoires à coût minimal dans des espaces pluridimensionnels ;
- résolution de problèmes combinatoires ;
- temps de recherche court par analyse "parallèle" des solutions (opposée à l'analyse séquentielle type ordinateur).

#### 4.412 - Fonctionnement

##### 4.4121 - Principe de base

L'espace pluridimensionnel engendré par n variables est représenté par toutes les projections des dimensions prises 2 à 2 (au nombre de $C_n^2$).

Dans ces projections, les incompatibilités mutuelles des variables selon leur état sont traduites par des zones d'interdiction et la recherche de la trajectoire la plus courte consiste à chercher dans toutes ces projections, l'ensemble des trajectoires liant les états terminaux des mêmes variables, cet ensemble étant constitué par les projections de la plus courte trajectoire dans l'espace pluridimensionnel.

Celle-ci se fait pas à pas selon une quantification proportionnelle au temps.

La projection de cette trajectoire sur les axes supportant chaque variable figure l'évolution des variables état par état et peut donc se traduire en un diagramme états/temps qui respecte les incompatibilités et assure l'optimisation globale du phénomène selon le critère choisi.

##### 4.4122 - Résumé du processus de recherche de la trajectoire à coût minimal

Le processus de recherche consiste, ayant défini les situations origine et terminale (groupements des états correspondants de chaque variable), à chercher dans tous les centres d'associations des états compatibles entre variables, des situations immédiatement antérieures à la terminale et respectant les contraintes.

A partir de ces dernières situations, on doit chercher à nouveau toutes les situations précédentes et ainsi de suite jusqu'à ce que cette exploration ait atteint l'ensemble des états de départ, c'est-à-dire la situation d'origine.

Le dernier vecteur ainsi défini, liant la situation de départ à une des situations compatibles les plus proches, représente le premier pas de la trajectoire pluridimensionnelle cherchée. La situation obtenue à l'issue de ce premier pas étant considérée comme nouvelle situation de départ, l'ensemble de la recherche est réitéré, et ainsi de suite jusqu'à ce que la trajectoire complète ait été parcourue.

4.4123 - Modalités de fonctionnement

4.41231 - Automaticité

La recherche de la trajectoire minimale pourra s'effectuer de manière rapide et automatique ou pas à pas à la convenance de l'opérateur.

4.41232 - Affectation des variables

Le dispositif permettra la simulation d'un phénomène non figé où seul le nombre de variables en cours d'évolution sera limité. L'affectation de ces variables sera quelconque, c'est-à-dire que toute variable rendue à son but pourra de nouveau être réutilisée pour simuler n'importe quelle nouvelle variable.

4.41233 - Priorité et hiérarchie

On pourra afficher un certain nombre de variables prioritaires selon quinze niveaux.

On pourra également afficher une hiérarchie générale de telle façon qu'en cas de conflit entre deux variables prioritaires ou non cette hiérarchie intervient.

*4.42 - Description*

4.421 - Composition

4.4211 - Centres d'inscription

La machine permettra la simulation de l'évolution d'un phénomène à huit variables.

Elle comprendra huit centres d'inscription (1 par variable) qui contiendront en mémoire par affichage sur matrice à broche, les états possibles de chaque variable, et les règles de passage d'un état à un autre, ces dernières sous forme de vecteurs pondérés.

4.4212 - Centres d'association de situations

Les centres d'association de situations, destinés à prendre en compte les incompatibilités entre couples de variables et dont les fonctions seront assurées par une seule matrice, seront au nombre de :

$$C_n^2 \text{ soit } \frac{8 \times 7}{2} = 28$$

4.4213 - Centre de coordination

Un tel centre sera prévu dans le but de distribuer les conditions logiques de fonctionnement.

4.4214 - Centre de priorité et hiérarchisation

Un tel centre sera prévu pour quinze niveaux de priorité et huit niveaux de hiérarchie.

## *4.43 - Caractéristiques de fonctionnement*

- durée de définition du pas le plus éloigné de la trajectoire pluridimensionnelle optimale : 150 ms (performances estimées)
- température de fonctionnement : +15 à + 55°
- consommation approximative : 1 200 W.

## *4.44 - Moyens d'entrée et de sortie des informations*

4.441 - Entrée des données

Par affichage sur matrices à broches type SEALECTOBOARD à deux et quatre plans à repérage adapté, seront entrées dans la machine les données suivantes :

- pondération systématique des règles de passage d'état à état selon trois types d'évolution possibles des variables : lent, moyen, rapide ; ces évolutions pouvant être entre elles comme les chiffres 1, 2, 3 par exemple ;
- nature des variables et leur affectation aux moyens qui constituent le support du phénomène ;

- état actuel de chaque variable à une unité de pondération de vecteur près ;
- état final de chaque variable ;
- priorités et hiérarchies des variables.

Les matrices de données seront au nombre de quatre soit :

- une matrice d'affectation de 14/18 à quatre plans ;
- une matrice hiérarchie-priorité et positions initiales de 15/14 à deux plans ;
- une matrice d'affichage de pondération de 18/70 à quatre plans ;
- une matrice de contraintes imbriquées (groupement des centres d'association de situations de 84/84 à deux plans.

Le nombre de plans donné à titre indicatif pourrait être revisé selon l'évolution de la technique.

4.442 - Sortie des résultats

L'affichage des résultats se fera sur machine à écrire électrique la mieux adaptée à cet emploi : les lignes représenteront le temps et les colonnes indiqueront les occupations des différents états.

*4.45 - Modularité, extension*

En vue de prévoir certaines extensions des capacités de la machine, celle-ci sera conçue selon une structuration modulaire. Un type de circuit représentera chaque variable, un second circuit représentera les contraintes localisées.

Des exemplaires de chaque circuit pourront être connectés aisément à l'ensemble fourni au cas où une extension paraîtrait souhaitable.

*4.46 - Présentation générale*

Le dispositif se présentera sous forme de deux meubles :

- une baie électronique genre RACK standard (Transrack ou autre) ;
- un pupitre d'exploitation comprenant les systèmes d'entrée et de sortie, les différentes commandes et une table de travail.

## 4.5 - ETUDE FONCTIONNELLE

### 4.51 - Généralités

Au paragraphe 4.3, nous avons défini les caractéristiques de base retenues pour la conception. Compte tenu de ces paramètres et des principes fondamentaux d'une structure "Mémoire Active" énoncés en 2.3, nous devons définir l'architecture propre de la machine.

### 4.52 - Position du problème

Nous sommes placés dans un espace à quatorze dimensions puisqu'au § 4.3, nous avons décidé de prendre en compte quatorze trains, chacun faisant l'objet d'une variable.

Nous savons aussi que notre machine travaillera en inscription négative, c'est-à-dire que l'on interdira les zones d'espace incompatibles. Le reste de l'espace se trouvera donc autorisé.

D'autre part nous devons exploiter au maximum notre "quintuplet d'hypothèses de base" énoncé à propos des systèmes neurophysiologiques (§ 1.443). Rappelons d'ailleurs l'idée directrice à l'origine de chacune des hypothèses :

- H 1 : décomposition de l'espace n dimensionnel en ses projections dans des espaces bidimensionnels ;
- H 2 : exploration de l'espace suivant un parallélisme total ;
- H 3 : recombinaison quasi instantanée des espaces bidimensionnels ;
- H 4 : adaptation permanente aux évolutions des paramètres représentatifs du milieu ;
- H 5 : possibilité d'apprentissage.

### 4.53 - Elaboration d'un problème à deux dimensions

#### 4.531 - Conception d'un réseau en logique câblée

Afin de simplifier l'exposé, examinons comment l'électronique peut nous permettre de construire une machine à deux dimensions capable de satisfaire aux hypothèses H 2 (parallélisme) et H 4 (adaptation).

Nous avons vu au chapitre I que l'idée des réseaux permettait souvent de construire des modèles de simulation de l'intelligence.

En reprenant cette idée (d'ailleurs exploitée dans les structures "Mémoires Actives" du chapitre II), nous pouvons construire un réseau carré maillé régulièrement (voir fig. 45a) dont deux côté peuvent représenter des axes de coordonnées. Chacun de ces axes représenterait une variable (un train dans le cas présent).

Supposons que chaque noeud du réseau soit relié au noeud voisin par l'intermédiaire d'une bascule. Les noeuds sont également reliés entre eux suivant les diagonales par une bascule analogue aux précédentes. L'ensemble de ces bascules est synchronisé par une horloge.

4.532 - Fonctionnement

Considérons un point origine (SD) de coordonnées (A, 2) dans ce réseau, et proposons-nous d'atteindre un point but (SA) de coordonnées (E, 6) à l'aide d'un train d'impulsions émis à partir de SD.

Supposons qu'au départ toutes les bascules soient remises à zéro. Nous aurons la suite d'évènements suivants :

- T 0 : un générateur d'impulsion est branché en SD ;

- T 1 : le premier créneau C 1 apparaît en SD et fait passer les bascules $B_{A2}^{A3}$, $B_{A2}^{B2}$ et $B_{A2}^{B3}$ à l'état 1 (l'indice indique les coordonnées du noeud amont et l'exposant, celles du noeud aval pour la bascule B) ;

- T 2 : le créneau C 2 apparaît en SD. Les bascules $B_{A3}^{A4}$, $B_{A3}^{B4}$, $B_{B3}^{B4}$, $B_{B3}^{C4}$, $B_{B3}^{C3}$, $B_{B2}^{C3}$, $B_{B2}^{C2}$ passent à l'état 1. A noter aussi que les bascules $B_{A3}^{B3}$ et $B_{B2}^{A3}$ passent aussi à l'état 1.

Mais cela ne change rien car le noeud B 3 avait déjà vu passer le créneau C 1 au temps T1 par $B_{A2}^{B3}$.

A ce temps tout se passe comme si le créneau C 1 était arrivé aux noeuds A 4, B 4, C 4, C 3, C 2 et que le créneau C 2 ait remplacé C 1 aux noeuds A 3, B 3 et B 2. Le créneau C 1 peut ainsi être considéré comme l'image de la tête d'une onde qui se propagerait dans le réseau. Nous conviendrons d'appeler cette tête, le "Front d'onde" ;

- T 3 : le créneau C 3 apparaît en SD. Le front d'onde arrive aux noeuds A 5, B 5, C 5, D 5, D 4, D 3, D 2 ;

- T 4 : le créneau C 4 apparaît en SD. Le front d'onde (représenté par C 1) arrive aux noeuds A 6, B 6, C 6, D 6, E 6, E 5, E 4, E 3, E 2.

Or le noeud E 6 est le point SA que l'on se proposait d'atteindre. A ce moment, il est possible d'interrompre le générateur d'impulsion et de compter le nombre de créneaux qui ont été émis en SD (ici 4). Ce nombre de créneaux émis correspond au nombre de temps élémentaires que le front d'onde a dû faire pour atteindre SA. Ici nous dirons que le front d'onde a mis 4 temps pour atteindre SA.

Par ce procédé, nous constatons que le front d'onde se propage simultanément dans toutes les directions du réseau. D'autre part, le temps d'exploration est égal au temps minimum que met le front pour aller de SD à SA. Ainsi nous respectons bien l'idée de l'exploration de l'espace suivant un parallélisme total (H 2).

4.533 - Introduction des contraintes

Suivant ce principe, il est très facile par un moyen extérieur, de bloquer certaines bascules, de manière que tout créneau attaquant l'entrée, ne fasse jamais passer cette bascule dans l'état 1. Ce blocage sélectif des bascules permet de faire aisément "l'inscription négative" qui, comme nous l'avons vu, consiste à interdire des zones incompatibles.

Si par exemple nous bloquons les bascules $B_{F4}^{G5}$, $B_{G4}^{G5}$, $B_{F5}^{G5}$, nous n'aurons jamais d'impulsion au noeud G5. Ceci signifie qu'au cours de l'exploration, aucun chemin ne pourra passer par ce point qui peut représenter une incompatibilité (une contrainte) imposée d'avance (impossibilité d'avoir simultanément Y = G et X = 5).

S'il existe une zone homogène de bascules bloquées entre SD et SA, cette surface interdite se comporte comme un "obstacle" pour le front d'onde émis de S'D et devant atteindre S'A.

Sur la figure 45a, cet obstacle est figuré par le blocage simultané des bascules $B_{F4}^{G5}$, $B_{F5}^{G5}$, $B_{G4}^{G5}$, $B_{F5}^{G6}$, $B_{G5}^{H6}$, $B_{G5}^{G6}$, $B_{G4}^{H5}$ et $B_{G5}^{H5}$.

Devant un obstacle, le front d'onde suit deux chemins, l'un dit chemin supérieur (CHS) contourne l'obstacle par-dessus, l'autre dit chemin inférieur (CHI) contourne l'obstacle par-dessous.

Le CHS permet de relier S'D à S'A en cinq temps alors que CHI réclame six temps.

Avec le système de propagation de l'onde envisagé au § 4.53, il faudrait compter cinq créneaux pour que le problème soit résolu, et ensuite mémoriser (bascules à 1) le CHS. Par contre sur le CHI, les dernières bascules ($B_{G6}^{H7}$ ou $B_{G7}^{H7}$) avant S'A seraient dans l'état zéro.

4.534 - Observations

Lorsqu'un obstacle[1] se trouve entre la situation de départ et la situation d'arrivée, l'exploration parallèle d'un réseau maillé permet de déterminer le cheminement le plus court pour relier ces deux points. Le choix fait au voisinage de l'obstacle, d'emprunter CHS ou CHI constitue le principe de base du choix.

Rappelons que la notion de choix est à la base même du comportement intelligent. Le mot latin "intelligere" signifie en effet "choisir entre".

Ainsi de ce choix entre CHS et CHI (moyennant un critère de nombre de temps minimum) dépend la qualité de la stratégie adoptée. Cette stratégie a pour conséquence d'imposer aux variables des progressions ou des arrêts (stationnements) et cela, dans un ordre judicieux de façon à ce que la combinaison de ces manoeuvres soit optimale.

Par exemple en prenant le CHI, la variable Y stationne au départ pendant quatre pas tandis que X progresse.

4.535 - Représentation de la progression du front d'onde sur un quadrillage (voir fig. 45b)

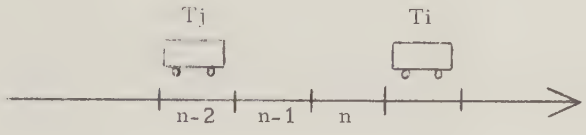
L'évolution de deux variables dans un plan peut se représenter dans un quadrillage où les bascules seraient placées aux noeuds du quadrillage et au milieu des côtés des carreaux. Il suffit d'affecter aux cases les chiffres correspondant aux fronts d'onde, ce qui permet de représenter une exploration du réseau maillé sans dessiner les bascules. Nous adopterons dorénavant cette représentation pour tout ce qui va suivre. La comparaison des fig. 45a et 45b permet de comprendre le mécanisme.

4.536 - Analogie entre un réseau maillé et le réseau ferroviaire (fig. 45c)

Aux variables X et Y, on peut affecter respectivement des trains T1 et T2 : on peut dire que T1 est sur l'itinéraire X et que T2 est sur l'itinéraire Y.

(1) Cet obstacle introduit une difficulté pour la résolution d'un problème. Il est intéressant de signaler que dans cette situation, le comportement de la machine peut être rapproché du comportement d'un être vivant devant une difficulté. Il existe donc une analogie avec la fameuse "loi de l'obstacle", formulée par le psychologue suisse CLAPAREDE qui considère que la difficulté entraîne une adaptation momentanée de l'être qui lui fait prendre conscience de cette réalité nouvelle (l'obstacle). De même, en présence d'un obstacle la machine se trouve désadaptée et il lui faut reconsidérer les paramètres de cette donnée afin d'entreprendre un cheminement conduisant à une stratégie adaptée.

Les itinéraires X et Y peuvent être divisés en segments ou "cantons" destinés à permettre une signalisation automatique. Il faut qu'un train T i ait quitté le canton n pour qu'un train T j puisse pénétrer sur le canton n - 2.




Compte tenu de la longueur des trains T1 et T2 et des conditions particulières de signalisation, il en résulte certaines incompatibilités de situations simultanées de trains sur certains cantons. Par exemple, on ne peut avoir simultanément T1 en 5, 6, 7, 8 et T2 en 4 ou 5. Cela se traduit par une zone de contrainte entre les itinéraires X et Y, représentés sur la fig. 45d.

Supposons que T1 parte du canton X = 2 pour aller au canton X = 9 et que T2 parte de Y = 1 pour aller en Y = 10.

Supposons que la vitesse des trains soit identique, si ces deux trains partent en même temps de leur origine, il vont "entrer en conflit" au voisinage du cisaillement des itinéraires X et Y. Le problème est donc de déterminer la meilleure stratégie (faire passer T1 avant T2 ou T2 avant T1) afin que ces deux trains aient atteint leur but dans un minimum de temps.

Représentons cette situation ferroviaire sur le réseau maillé précédemment défini :

- coordonnées de la situation de départ SD : X = 2, Y = 1
- coordonnées de la situation d'arrivée SA : X = 9, Y = 10
- zone de contrainte : (X = 5, Y = 4), (X = 6, Y = 4), (X = 7, Y = 4), (X = 8, Y = 4), (X = 5, Y = 5), (X = 6, Y = 5), (X = 7, Y = 5), (X = 8, Y = 5).

En faisant une exploration, dans ce réseau, le CHS arrive en neuf pas alors que le CHI met 13 pas. La meilleure stratégie est donc de prendre le CHS. Cela conduit à faire progresser simultanément les deux trains vers l'obstacle puis à faire stationner T1, tandis que T2 traverse la zone de conflit. Ce choix entre CHS et CHI a permis de trouver l'ordonnancement optimum de ces deux trains (qui constitue à faire passer T2 avant T2 sur la zone de cisaillement).

### 4.537 - Remarques

La machine bidimensionnelle que nous venons de construire ne satisfait cependant qu'à l'hypothèse H 2 sur le parallélisme. Il est malgré tout possible de prendre en compte l'hypothèse H 4 relative à l'adaptation. Ceci nous amène à exposer les types d'exploration.

4.538 - Les différents types d'exploration

Dans l'exploration qui consiste à émettre un train d'impulsions à partir de SD, la zone de contrainte est supposée parfaitement déterminée et ne peut varier.

Convenons d'appeler ce type : exploration α (voir fig. 45e). Cette méthode directe convient très bien pour un plan, mais pour passer à l'espace n dimensionnel, ce principe devient inapplicable car une même variable X est combinée avec chacune des autres variables qui constituent l'espace n dimensionnel. D'autre part la zone de contrainte est figée.

Une deuxième méthode dite inverse consiste à considérer la situation d'arrivée comme point de départ de l'exploration et d'essayer d'atteindre la situation de départ SD. Ce type d'exploration dit rétrograde est appelé exploration β (fig. 45f). Cette exploration permettra de définir seulement le premier pas de progression du point SD. Cette dernière progression, qui définit en fin de compte le véritable cheminement suivi, est appelée progression γ ou encore temps γ ou pas γ (fig. 45g).

L'exploration β et la progression γ permettent de prendre en compte l'hypothèse H 4 sur l'adaptation.

4.539 - Etude du mécanisme d'exploration suivant la méthode inverse : principe d'optimalité

4.5391 - Principe

Le fonctionnement de l'exploration β est identique à celui d'une exploration α. Un pas γ ne fait cependant déplacer le point SD que d'un seul temps. (Voir fig. 45h et 45i).

La méthode consiste à réitérer l'exploration β et le pas γ en considérant S'D comme nouvelle situation de départ et à progresser ainsi de pas γ en pas γ jusqu'à ce que l'on ait atteint la situation d'arrivée SA.

Cette recherche par itération est basée sur le principe d'optimalité de BELLMANN : "une politique optimale est telle que quels que soient l'état initial et la décision initiale, les décisions suivantes doivent constituer une politique optimale par rapport à l'état résultant de la première décision".

Ce principe d'optimalité peut s'énoncer d'une manière plus adaptée à notre représentation de situations successives suivant la version suivante due au Professeur NASLIN : "Toute portion d'une trajectoire optimale comprise entre un point intermédiaire quelconque et le point final constitue également la trajectoire optimale entre le point intermédiaire considéré et le point final".

En effet entre l'élaboration de deux pas γ successifs, un évènement extérieur peut faire changer la zone de contrainte. Selon le principe d'optimalité, la machine est capable de réévaluer sa stratégie pour entreprendre une nouvelle politique optimale, compte tenu de l'évènement qui vient de survenir.

4.5392 - Exemple d'adaptabilité

Considérons la fig. 45i et supposons que la zone de contrainte soit modifiée et devienne celle de la fig. 45j lorsque le pas γ 2 est effectué. Jusqu'en γ 2, la machine avait choisi une stratégie en fonction de la zone de contrainte (1). Or en 45 j, la zone de contrainte devenue (2), la machine s'adapte à cette nouvelle situation, en faisant le pas γ 3 qui montre que la politique précédente γ 1 et γ 2 est modifiée. Mais cette nouvelle politique engagée avec γ 3 est maintenant optimale compte tenu de la nouvelle situation (zone de contrainte 2).

L'adaptation se fait lorsqu'on modifie la zone de contrainte, elle se ferait de la même façon si l'on modifiait les coordonnées de la situation d'arrivée SA, ou si une donnée supplémentaire intervenait.

Il faut souligner ici que cette propriété d'adaptation est incluse dans les facultés de l'intelligence. Rappelons que selon la définition classique, l'intelligence caractérisait en effet la faculté d'adaptation à des situations nouvelles.

## 4.54 - *Elaboration d'un problème à n dimensions*

Introduction

Il est relativement aisé de montrer de quelle manière s'applique le principe d'optimalité dans le cas d'une recherche dans un réseau composé par un ensemble de noeuds reliés par des mailles orientées et pondérées.

Cette recherche, qui s'effectue par étapes successives, est rétrograde et récurrente de telle manière que la résolution du problème de décision se posant à chaque étape utilise les solutions de l'étape précédente. Cette méthode est la clé de la programmation dynamique. Cependant, ce processus seul ne peut convenir pour un système qui ferait intervenir l'utilisation de plusieurs réseaux que l'on doit rendre indépendants pour traduire les évolutions concevables de plusieurs systèmes réagissant par contraintes les unes sur les autres.

En effet, si on effectue une recherche rétrograde dans chacun des réseaux entre le point d'arrivée et le point de départ, il n'est pas possible d'arrêter cette recherche quand le point de départ est atteint dans un des réseaux seulement ; il faut attendre qu'il le soit dans tous les réseaux simultanément. A cet instant où la recherche est alors arrêtée, il est impossible de déterminer dans chaque réseau une "liaison immédiate" entre le point de départ et le point d'arrivée, car ce que l'on cherche dans chaque réseau est maintenant le trajet composant de la trajectoire n dimensionnelle optimale et rien ne permettrait de distinguer dans cette liaison immédiate le trajet composant recherché des autres trajets.

En d'autres termes, une trajectoire optimale n dimensionnelle n'a pas généralement pour projections les trajectoires optimales existant dans les projections de son hyperespace.

4.541 - Considérations générales

D'après l'hypothèse H 1, on peut décomposer cet espace n dimensionnel en ses projections dans des espaces bidimensionnels réalisés comme celui du paragraphe 4.53.

Chaque axe de l'espace n dimensionnel est divisé en segments de même longueur, égale par exemple à l'unité de temps choisie. A chaque train est affecté un axe. A l'extrémité de chaque segment est associée une position sur le réseau ferroviaire, séparée de la position précédente par la distance que le train parcourt en une unité de temps à la vitesse prévue sur ce tronçon.

Toute solution du problème est un chemin entre le point représentatif des situations initiales des trains et le point but (tous les trains sont routés).

Dans cet espace n dimensionnel, les contraintes sont représentables par des cylindres orthogonaux aux espaces bidimensionnels de projection (C.A.S.) fig. 45j bis. Une optimisation induite par ce mode de représentation est la minimisation de la longueur du chemin dans cet espace, c'est-à-dire dans la recherche d'une solution correspondant au temps de routage minimal.

L'espace étant représenté par l'ensemble de tous les plans liant les situations de deux variables, les cylindres représentatifs des contraintes de l'espace dégénèrent dans les C.A.S. en des surfaces interdites. Un point de l'espace sera interdit si et seulement si l'une au moins de ses projections est interdite.

Disposant de la progression $\gamma$ pas à pas dans chacun de ces plans (C.A.S.), on peut penser qu'il serait judicieux de reconstruire l'espace n dimensionnel pour chaque pas $\gamma$ dans chaque C.A.S. Ce but serait de satisfaire l'hypothèse H 3 sur la recombinaison quasi instantanée des espaces bidimensionnels. Cette recombinaison en inscription positive se faisait grâce aux centres d'association d'action C.A.A.

Or en inscription négative et avec les vecteurs d'action 0 ou 1, la technique C.A.A. est inapplicable. Il faut donc construire des centres qui soient capables d'indiquer si les pas $\gamma$ envisageables dans chaque C.A.S. sont compatibles au niveau de l'espace, afin de définir le vecteur $\vec{\gamma}$ n dimensionnel résultant. Ces fonctions seront réalisées par les centres de validation d'actions (C.V.A.), et le centre de vérification de cohérence (C.V.C.).

D'autre part il faudra disposer d'un centre de mémorisation qui prenne en compte la progression de chaque variable et qui soit ainsi capable de transformer l'extrémité du vecteur $\vec{\gamma}n$ en nouvelle situation de départ afin de définir le vecteur $\vec{\gamma}n + 1$ de l'espace n dimensionnel. Ce centre de mémorisation à décalage automatique sera réalisé par ce que nous appellerons le "centre module trains".

## 4.542 - Etude fonctionnelle du centre d'association de situations (C.A.S.)

### 4.5421 - Les fonctions du C.A.S.

Dans chaque C.A.S., après une exploration β, le point de départ SD est théoriquement susceptible de se déplacer suivant quatre pas γ différents (γ1, γ2, γ3, γ4) qui correspondent aux quatre couples d'action possibles de deux variables à deux états (voir fig. 45k).

1) x = 0, y = 0 donne γ1
   Le point SD stationne en (x = 3, y = 2)

2) x = 0, y = I donne γ2
   SD passe en (x = 3, y = 3)

3) x = I, y = I donne γ3
   SD passe en (x = 4, y = 3)

4) x = I, y = 0 donne γ4
   SD passe en (x = 4, y = 2).

Au niveau du plan, on a intérêt à choisir le vecteur γ qui s'oriente vers le plus court chemin donné par l'exploration β. Dans le cas de la fig. 45k, on aurait intérêt à choisir γ4 ou γ3 qui permettent de "toucher" le front d'onde β au bout de sept pas β. Cependant dans le cas d'un espace à 14 dimensions, x est analysé 13 fois avec d'autres variables. Il n'est donc pas certain (et même rare) que l'action x = 1 permettent γ3 et γ4 dans le plan (x y) par exemple soit compatible avec le pas γ donnant le vecteur orienté vers le plus court chemin dans le plan (x z). A priori on ne peut donc pas dire lequel des quatre pas γ au niveau du plan sera retenu pour former la composante du vecteur $\vec{\gamma}$ de l'espace 14 dimensionnel.

Il faut donc mémoriser le nombre de pas β minimum qui rendront possibles ces quatre pas γ1, γ2, γ3, γ4 afin de les traiter avec les autres résultats des autres C.A.S. et de pouvoir ainsi définir un vecteur résultant à la fois cohérent et optimum (cest-à-dire qui se trouve sur la trajectoire la plus courte de l'espace n dimensionnel).

Convenons d'appeler N β ces nombres de pas β minimum. Chaque C.A.S. devra donc fournir après l'exploration quatre paramètres fondamentaux que nous appellerons :

N β XO, N β XI, N β YO, N β YI[1]

N β XO signifie : nombre minimum de pas nécessaire pour que l'action X = 0 soit possible

N β YI signifie : nombre minimum de pas nécessaire pour que l'action Y = I soit possible

etc...

(1) La valeur exacte de ces paramètres est fonction de la position de SD par rapport à la zone de contrainte. Une étude détaillée des valeurs à donner sera faite au paragraphe 4.7113.

4.5422 - Notion de hiérarchie interactions

A) Définition

Etant donné qu'une variable peut faire a priori l'action 0 ou 1, il est possible de faire un choix sur le type de vecteur d'action à tenter en premier pour chaque variable. Il peut arriver en effet que l'on obtienne des solutions équivalentes à partir d'un certain point lorsqu'une variable fait l'action 0 ou 1.

Sur la fig. 45ℓ par exemple, la situation d'arrivée peut être atteinte en neuf pas $\gamma$ par le chemin 1) ou le chemin 2). Au premier pas $\gamma$ à partir de SD, le chemin 1) est réalisé avec Y = 1, tandis que le chemin 2) s'élabore avec Y = 0.

Cette possibilité de choisir entre le chemin 1) et le chemin 2) peut être donnée par une hiérarchisation des actions 1 et 0 de la variable Y. Si 1 est classé avant 0, on empruntera le chemin 1). Si 0 est classé avant 1, on empruntera le chemin 2). Cette hiérarchie interactions doit être arbitrairement ou selon une préférence (voir discussion au paragraphe 5.322) affichée avant d'entreprendre un pas $\gamma$.

B) Importance de la hiérarchie interactions en ordonnancement ferroviaire

Sur la fig. 45ℓ, le chemin 1) correspond à la progression simultanée des deux trains X et Y vers l'obstacle. Ce n'est qu'au voisinage de l'obstacle que le train Y s'arrêtera pour laisser passer le train X. Si l'on considère le chemin 2), le train Y stationne au départ au lieu de stationner au voisinage de l'obstacle. Il partira dès qu'il sera possible de franchir la zone de conflit sans arrêt.

L'exploitation par le chemin 1), consistant à classer l'action 1, première hiérarchiquement, sera dite "exploitation avec 1 en tête". C'est le type d'exploitation qui convient sur les lignes à forte densité de circulation, ou lorsque le régime des circulations est perturbé. Cela permet de faire avancer au maximum les trains vers les zones de conflits et par conséquent de "dégager" les voies pour les trains suivants.

L'exploitation par le chemin 2) qui serait obtenue en classant hiérarchiquement l'action 0 avant l'action 1, sera dite : "exploitation avec 0 en tête". Ce mode de travail est particulièrement adapté lorsque les trains partent de gares ou de triages. Dans ce cas on a intérêt à "retenir" au maximum les trains en ces points et à n'autoriser leur départ qu'au moment où on sera certain qu'ils pourront franchir la zone de conflits sans ralentissement. Cette méthode permet d'économiser des arrêts et des redémarrages de trains au voisinage d'obstacles.

Evidemment le choix de l'un ou l'autre type d'exploitation devrait conduire à des ordonnancements de même longueur en pas $\gamma$, donc en temps (nous verrons qu'en pratique ce n'est pas exactement le cas).

4.5423 - Notion de hiérarchie intervariables

Au niveau du C.A.S., il peut arriver (fig. 45m) que l'exploration donne un nombre de pas strictement équivalent selon qu'on emprunte le chemin supérieur ou le chemin inférieur (CHS = CHI). Dans ce dernier cas, les chemins CHS et CHI seraient en compétition, ce qui constitue le dilemme d'Abélard.

Cette ambiguïté est levée en classant arbitrairement les variables suivant une suite hiérarchisée. La première, classée hiérarchiquement dans cette suite, aura la priorité sur toutes les autres (dans l'éventualité où CHS = CHI), pour effectuer son action classée première en hiérarchie interactions.

Par analogie avec la hiérarchie existant entre les actions, il en existe une aussi entre les variables dites "hiérarchie intervariables" qui doit être affichée avant l'élaboration du pas $\gamma$(1).

Ainsi sur la fig. 45m, si X est classé hiérarchiquement avant Y et si l'action prioritaire de X est 1, cette variable fera en priorité le vecteur d'action 1 alors que Y fera l'action 0 au premier pas $\gamma$ à partir de SD.

4.5424 - Notion de priorité

Dans un ordonnancement de l'espace n dimensionnel, il peut être intéressant pour des raisons d'exploitation, de faire progresser coûte que coûte certaines variables au détriment de l'optimum de cet ordonnancement. Les variables faisant l'objet de ce choix, seront dites : "variables prioritaires".

La priorité consiste donc à imposer une relation de préordre sur un certain groupe de p variables. L'ordonnancement sera optimum seulement pour les n-p variables classées non prioritaires.

Au niveau du C.A.S., il est assez aisé d'intégrer cette notion de priorité en éloignant fictivement le but des variables prioritaires (voir fig. 45n).

Dans la situation SA-SD, c'est le chemin supérieur qui arrive le premier en SD avec 9 pas $\beta$ contre 11 pour le CHI. Dans ce cas, X stationnera au départ ou au voisinage de l'obstacle (selon la hiérarchie interactions de cette variable). Si X était une variable prioritaire, elle devrait atteindre son but SA sans stationner. Pour réaliser cette condition, il suffit en quelque sorte de "tricher", avec l'exploration $\beta$ en éloignant fictivement le but SA de X d'un nombre de pas suffisant pour que ce soit le chemin inférieur CHI qui arrive le premier en SD et qui permette à X de progresser sans arrêt (point S'A de la fig. 45n).

En considérant S'A comme situation d'arrivée pour X, on voit que le CHI arrive en SD en 15 pas $\beta$ alors que le CHS arrive en dix sept pas $\beta$. Ainsi X pourra passer avant Y qui stationnera au voisinage de l'obstacle au départ.

(1) Cet affichage est réalisé manuellement par matrices à fiches. Des précisions seront données au paragraphe 4.8 (réalisation des entrées).

Cet éloignement fictif de but se fait en introduisant un nombre dans un compteur dit "d'éloignement fictif de but" qu'il faut décompter avant d'entreprendre l'exploration β (voir fig. 47111c).

Il faut noter que la progression γ s'arrête dès que la variable prioritaire a atteint son but réel et non pas son but fictif. Ce but fictif ne joue que lors de l'exploration β.

4.5425 - Notion de fonctionnement en statique et fonctionnement en dynamique

A) Position du problème

Considérons un itinéraire X coupant un itinéraire Y (fig. 45o). Supposons que sur l'itinéraire X se suivent des trains prioritaires $T\,I_p$, $T\,2_p$, $T\,3_p$, $T\,k_p$, et que sur l'itinéraire Y un train non prioritaire T'1np soit sur le segment M N. D'après ce que nous avons vu au paragraphe 4.5424 sur la priorité, tous les trains prioritaires bénéficieront d'un éloignement fictif de leur but et de ce fait risqueront de toujours passer avant T'1np au noeud O, même s'ils apparaissent un temps Δ T plus tard sur l'itinéraire x. C'est ainsi que cela se passe en fonctionnement statique.

Cependant pour éviter que T'1np ne stationne trop longtemps au noeud O (à la limite il ne le franchirait jamais si des trains prioritaires se succèdent constamment sur l'itinéraire X) il est possible de lui faire acquérir de la priorité avec le temps, afin qu'il soit compétitif avec un train prioritaire Tkp et puisse franchir le noeud O. C'est l'objet du fonctionnement dynamique. Au fur et à mesure qu'une variable "vieillit" dans la machine, elle acquiert du poids (en priorité) par rapport aux variables prises en compte Δ t plus tard. Dans ce type de fonctionnement, il se produit une sorte de priorité automatique indexée au temps.

B) Aspect théorique du fonctionnement en dynamique

Ce mode de fonctionnement est particulièrement intéressant lorsque de nouvelles variables doivent être intégrées en cours de traitement. En effet dans ce type de problème, on pourrait introduire les nouvelles variables dans l'ordonnancement au moment où elles se présentent, sans les différencier de celles qui étaient en cours de traitement. La méthode de résolution du problème est du type "ordonnancement d'entreprise". Il est traité avec le minimum possible de contraintes, uniquement celles de situation et donc théoriquement, le temps total d'ordonnancement est minimal. A chaque instant, on détermine la solution de façon à ce que le but actuel soit atteint au plus tôt. Mais on ne tient pas compte du retard particulier apporté à l'une ou l'autre des variables.

Si le nombre de variables est élevé, relativement à l'importance des contraintes du problème, c'est-à-dire s'il y a "embouteillage", une variable quelconque peut être à chaque instant considérée comme la moins urgente par suite d'une modification permanente du but par prise en compte de nouvelles variables, et il y aurait "blocage" de la première (train T'1 np). Si ces blocages sont inadmissibles, le fonctionnement dynamique permet de donner une solution avec limitation de la variation relative du temps d'ordonnancement de chaque variable.

Ainsi toute variable ordonnancée devra sortir un temps $\tau$ i après son entrée de telle sorte qu'il y ait un facteur de réduction de la différence de valeur entre les $\tau$ i relatifs aux diverses variables (voir fig. 45p).

C) Application à un noeud ferroviaire

Considérons sur la fig. 45p les trains T1 pris en compte à l'instant t1 et des trains T2 pris en compte à l'instant t2 = t1 + $\Delta$ t.

On veut que la sortie des trains T1 ait lieu en moyenne au temps t1 + $\tau$ et celle des trains T2 environ au temps t2 + $\tau$ = tI + $\Delta$ t + $\tau$. Les trains T2 doivent sortir du noeud ferroviaire alors que les trains T1 progressent au-delà de ce noeud depuis un temps $\Delta$ t.

Afin d'être certain que les trains T 1 passeront bien avant les trains T 2 (arrivés $\Delta$ t plus tard), on ajoute à la fin du parcours de T 1 un temps de valeur $\Delta$ t représentant la progression fictive des trains T 1 au-delà du noeud ferroviaire. Ainsi au temps t 2, les trains T 1 ont acquis une priorité $\Delta$ t sur les trains t 2 par éloignement fictif de but. Cela est réalisé en augmentant, à chaque pas $\gamma$, le parcours de tout train d'une unité de temps. Cette partie de parcours ainsi simulée dite canton de "position but", représente une progression au-delà du noeud ferroviaire, partie d'itinéraire qui ne comprend évidemment pas de contrainte de situation. Deux trains pris en compte au même moment auront leur parcours augmenté d'une même quantité.

Exemple : fig. 45q

soit un train T 1 et un train T2

T 1 entre sur le noeud ferroviaire cinq unités de temps avant T 2. En fonctionnement dynamique, il faut ajouter cinq unités de temps, au parcours de T 1.

La solution obtenue par le chemin 1) donne un ordonnancement en seize pas. Par contre si on désire optimiser le temps global d'ordonnancement sans rien considérer d'autre, on laisse inchangé le parcours de T 1. La solution déterminée dans ce cas passe par le chemin 2). Cette solution en 14 pas est inférieure en temps global à la précédente solution en 16 pas $\gamma$.

4.5426 - Conclusion

En résumé, les fonctions du C.A.S. sont extrêmement importantes. Elles permettent d'une part de déterminer les quatre paramètres de base N$\beta$ XO, N$\beta$ XI, N$\beta$ YO, N$\beta$ YI et d'autre part de prendre en compte des variantes de fonctionnement introduites avec la hiérarchie interactions, la hiérarchie intervariables, la priorité, l'ordonnancement statique et l'ordonnancement dynamique.

4.543 - Etude fonctionnelle du Centre de Validation d'Actions (C.V.A.)

A) Les paramètres de base des C.A.S. N$\beta$ XO, N$\beta$ XI, N$\beta$ YO, N$\beta$ Y1 doivent être mémorisés afin d'être comparés ensuite dans le but de définir le vecteur résultant $\vec{\gamma}$.

Cette mémorisation se fait dans des centres dits de validation d'actions. En plus de la mémorisation ces centres devront dialoguer avec l'organe de cohérence pour déterminer les actions élémentaires 0 ou 1 de chaque variable qu'il est possible de faire.

Ces centres possèdent donc deux fonctions principales :

1) la mémorisation des paramètres de base des C.A.S.

2) la validation des actions compte tenu de la cohérence.

Ce centre est l'intermédiaire indispensable qui permet de prendre en compte l'espace n dimensionnel. Il participe pour une part importante à l'hypothèse H3 sur la recombinaison des espaces bidimensionnels.

B) Mémorisation et traitement des paramètres

Dans un espace n dimensionnel il y a $\frac{n\,(n-1)}{2}$ couples de variables prises deux à deux. Une variable j est comparée avec les n - 1 autres, dans des C.A.S. différents. Ceci entraîne pour la variable j (n - 1) paramètres $N\beta\ j1$ et n - 1 paramètres $N\beta\ j0$. Chacun de ces paramètres sera noté $N^{i}_{\beta j1}$ i entier, i indiquant la variable avec laquelle est considérée la variable j. Le centre de validation de la variable j doit donc effectuer un traitement de ces (n - 1) valeurs pour faire une action. Il est logique de penser que le paramètre à retenir soit le plus grand des (n - 1) $N^{i}_{\beta j1}$ et le plus grand également des (n - 1) $N^{i}_{\beta j0}$, afin de s'assurer que l'exploration β est bien terminée dans tous les cas.

Exemple : fig. 45r1, 45r2, 45r3

- en 45r1 : $N^{Y}_{\beta}\ X0 = 7$, $N^{Y}_{\beta}\ X1 = 7$ ; $N^{X}_{\beta}\ Y0 = 7$, $N^{X}_{\beta}\ Y1 = 6$
- en 45r2 : $N^{X}_{\beta}\ Z0 = 8$, $N^{X}_{\beta}\ Z1 = 7$ ; $N^{Z}_{\beta}\ X0 = 8$, $N^{Z}_{\beta}\ X1 = 8$
- en 45r3 : $N^{Y}_{\beta}\ Z0 = 7$, $N^{Y}_{\beta}\ Z1 = 7$ ; $N^{Z}_{\beta}\ Y0 = 7$, $N^{Z}_{\beta}\ Y1 = 7$(1)

Le C.V.A. mémorisera donc :

$$\text{C.V.A. } X\begin{cases} N_{\beta X0} = MAJ\ (N^{Y}_{\beta X0},\ N^{Z}_{\beta X0}) = 8 \\ N_{\beta XI} = MAJ\ (N^{Y}_{\beta XI},\ N^{Z}_{\beta XI}) = 8 \end{cases}$$

$$\text{C.V.A. } Y\begin{cases} N_{\beta Y0} = MAJ\ (N^{X}_{\beta Y0},\ N^{Z}_{\beta Y0}) = 7 \\ N_{\beta YI} = MAJ\ (N^{X}_{\beta YI},\ N^{Z}_{\beta YI}) = 7 \end{cases}$$

$$\text{C.V.A. } Z\begin{cases} N_{\beta Z0} = MAJ\ (N^{X}_{\beta Z0},\ N^{Y}_{\beta Z0}) = 8 \\ N_{\beta ZI} = MAJ\ (N^{X}_{\beta ZI},\ N^{Y}_{\beta ZI}) = 7 \end{cases}$$

(1) Ces valeurs sont définies par l'étude 4.71132 (étude des cas possibles C.A.S.) qui précise les valeurs des $N_{\beta X}$ et $N_{\beta Y}$ en fonction de la forme du front d'onde.

Pour déterminer le nombre minimum de pas β nécessaire dans tous les C.A.S. pour qu'une action au moins soit possible par variable il faut prendre les minima entre l'action 0 et l'action 1 pour une même variable.

Par exemple :

$$MIN\ (N_{\beta XO}, N_{\beta XI}) = 8$$

$$MIN\ (N_{\beta YO}, N\beta YI) = 7$$

$$MIN\ (N_{\beta ZO}, N_{\beta ZI}) = 7$$

Pour être certain que l'exploration β ait lieu au minimum dans tous les C.A.S., il faut reconsidérer la valeur maximum de ces minimum.

$$N_\beta = MAX\ [MIN\ (x), MIN\ (y), MIN\ (z)] = 8$$

On peut affirmer qu'en huit temps β il y aura au moins une action possible par variable dans tous les C.A.S.

Pour déterminer les actions possibles il faut comparer $N_{\beta j0}$ et $N_{\beta j1}$ à $N_\beta$. Les cas possibles sont les suivants :

- $N_{\beta j0} < N_\beta$ l'action 0 de la variable j est validée ;
- $N_{\beta j0} > N_\beta$ l'action 0 de la variable j n'est pas validée ;
- $N_{\beta j1} < N_\beta$ l'action 1 de la variable j est validée ;
- $N_{\beta j1} > N_\beta$ l'action 1 de la variable j n'est pas validée.

*Nota :*

On conviendra de représenter la validation d'une action par une croix dans la case correspondante des tableaux suivants.

C) Représentation du mécanisme C.V.A. par un tableau

| | | X | Y | Z | MAX | MIN | MAX (MIN) | Actions autorisées |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| X | 0 | | $N^Y_{\beta XO}$ | $N^Z_{\beta XO}$ | $N_{\beta XO}$ | $N_{\beta X}$ | $N_\beta$ | |
| | 1 | | $N^Y_{\beta X1}$ | $N^Z_{\beta X1}$ | $N_{\beta X1}$ | | | |
| Y | 0 | $N^X_{\beta YO}$ | | $N^Z_{\beta YO}$ | $N_{\beta YO}$ | $N_{\beta Y}$ | | |
| | 1 | $N^X_{\beta Y1}$ | | $N^Z_{\beta Y1}$ | $N_{\beta Y1}$ | | | |
| Z | 0 | $N^X_{\beta ZO}$ | $N^Y_{\beta ZO}$ | | $N_{\beta ZO}$ | $N_{\beta Z}$ | | |
| | 1 | $N^X_{\beta Z1}$ | $N^Y_{\beta Z1}$ | | $N_{\beta Z1}$ | | | |

L'exemple considéré de la fig. 45r donnerait le tableau ci-dessous :

| | | X | Y | Z | MAX | MIN | MAX (MIN) | Actions autorisées | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| X | 0 | | 7 | 8 | 8 | 8 | 8 | X | Si |
| | 1 | | 7 | 8 | 8 | | | X | |
| Y | 0 | 7 | | 7 | 7 | 7 | | X | |
| | 1 | 6 | | 7 | 7 | | | X | |
| Z | 0 | 8 | 7 | | 8 | 7 | | X | |
| | 1 | 7 | 7 | | 7 | | | X | |

Tableau 4543 D

4.544 - Etude fonctionnelle du Centre de vérification de cohérence

4.5441 - Généralités

Pour reconstruire correctement l'espace n dimensionnel, il est nécessaire de s'assurer que les pas $\gamma$ que l'on entreprendra dans chaque C.A.S. seront compatibles. Cette vérification de la compatibilité explique la raison d'être du Centre de vérification de cohérence C.V.C.

4.5442 - Objectifs du C.V.C.

- Prendre en compte les actions validées par le C.V.A. ;
- prendre en compte les incompatibilités d'action dues aux contraintes dans le C.A.S. (interdiction de situation) et au regroupement interdit par le C.V.A. (interdiction de recombinaison) ;
- choisir le système d'actions le meilleur compte tenu de la hiérarchie interactions et intervariables.

4.5443 - Définition de la cohérence

Un système $S_i$ d'actions sera dit cohérent si après "passage" dans un filtre (le C.V.C.) chargé d'éliminer les actions incompatibles (dues aux contraintes), on obtient en sortie un système d'action S'i identique à celui d'entrée $S_i$ (fig. 4544a).

4.5444 - Structure d'un élément de C.V.C. - Equations

Le problème consiste à réaliser un organe qui serait capable de comparer deux à deux toutes les actions introduites à l'entrée et de déterminer leur compatibilité en fonction des interdictions d'action en provenance du C.A.S. et des C.V.A.

Une comparaison élémentaire de deux actions pourrait avoir la structure logique de la fig. 4544b.

a' serait la validation de l'action a

b' " " " b

Les équations logiques seraient :

$a' = a \cdot \overline{int\ (a, b)} \cdot b$

$b' = b \cdot \overline{int\ (a, b)} \cdot a$

Pour que les actions soient validées en sortie, il faut que les deux actions existent à l'entrée et qu'il n'y ait pas d'interdiction entre ces actions.

Pour simplifier la suite de l'exposé, on représentera la comparaison élémentaire de deux actions a et b par deux fils et l'autorisation de faire ces actions par un point (voir fig. 4544c).

Suivant ce principe on peut construire un élément de C.V.C. capable de faire la comparaison entre deux variables (sachant que pour chaque variable deux actions 0 et 1 sont possibles).

Une action d'une variable devra être au moins possible si l'une des deux autres actions de l'autre variable l'autorise.

Cela conduit aux équations suivantes :

(454441) $a'0 = a0 \cdot b_1 \cdot \overline{int\ (a0, b_1)} + a0 \cdot b0 \cdot \overline{int\ (a0, b0)}$

(454442) $a'1 = b_1 \cdot a_1 \cdot \overline{int\ (a_1, b_1)} + b0 \cdot a_1 \cdot \overline{int\ (a_1, b0)}$

(454443) $b'1 = a_1 \cdot b_1 \cdot \overline{int\ (a_1, b_1)} + b_1 \cdot a0 \cdot \overline{int\ (a0, b_1)}$

(454444) $b'0 = b0 \cdot a_1 \cdot \overline{int\ (b0, a_1)} + b0 \cdot a0 \cdot \overline{int\ (b0, a0)}$

Notons que pour la variable X (sur la fig. 4544d) $a_1$ représente l'action 1 et $a_0$ l'action 0 ; de même pour Y, $b_1$ représente l'action 1 et $b_0$ l'action 0. La structure logique d'un élément de C.V.C. serait celle donnée par la fig. 4544e.

4.5445 - Structure d'un C.V.C. pour un espace n dimensionnel

A) Le problème consiste à comparer chaque variable (avec les deux actions) non pas avec une seule autre comme nous l'avons fait en 4.5444 mais avec toutes les autres et ceci une seule fois.

L'idée qui vient à l'esprit est de dresser une matrice carrée (voir fig. 4544f) dont les lignes et colonnes porteront les variables considérées. Chaque élément de cette matrice serait alors analogue à l'élément de C.V.C. défini au paragraphe précédent.

Or la comparaison étant une opération symétrique il en résulte que comparer X avec Y est strictement identique à comparer Y avec X. En conséquence seule la demi-matrice de la fig. 4544f nous sera utile pour être certain de comparer une fois et une fois seulement chaque variable avec toutes les autres. D'autre part les éléments de la diagonale principale sont inutiles puisque la comparaison de X avec X ne se pose pas. Cela conduit donc à la structure de la fig. 4544g.

B) Equations généralisées du C.V.C. d'un espace n dimensionnel

S'il y a n variables, chacune de ces variables subit (n - 1) comparaisons définies par les équations 454441 à 454444.

Dans ces conditions les équations deviennent

$$a'_1 = a_1 \bullet \left[ b_1 \bullet \overline{\text{int } (a_1 \bullet b_1)} + b_0 \overline{(\text{int } a_1 \bullet b_0)} + C_1 \bullet \overline{\text{int } (a_1 \bullet C_1)} + C_0 \overline{\text{int } (a_1 \bullet C_0} + \ldots\ldots\ldots + N_1 \overline{\text{int } (a_1, n_1)} + N_0 \bullet \overline{\text{int } (a_1 \bullet n_0)} \right]$$

Ce qui peut s'écrire sous une forme générale que nous appellerons :

Equations généralisées du C.V.C.

$$i'_1 = i_1 \left[ \sum_{j=1}^{j=i-1} \left\{ j_1 \bullet \overline{\text{int } (i_1 \bullet j_1)} + j_0 \bullet \overline{\text{int } (i_1 \bullet j_0)} \right\} + \sum_{j=i+1}^{j=n} \left\{ j_1 \bullet \overline{\text{int } (i_1 \bullet j_1)} + j_0 \bullet \overline{\text{int } (i_1 \bullet j_0)} \right\} \right]$$

de même :

$$i'_0 = i_0 \left[ \sum_{j=1}^{j=i-1} \left\{ j_1 \bullet \overline{\text{int } (i_0 \bullet j_1)} + j_0 \bullet \overline{\text{int } (i_0 \bullet j_0)} \right\} + \sum_{j=i+1}^{j=n} \left\{ j_1 \bullet \overline{\text{int } (i_0 \bullet j_1)} + j_0 \overline{\text{int } (i_0 \bullet j_0)} \right\} \right]$$

*Nota :*

Il faut rappeler que les symboles $(_o)$, (+), $(\Sigma)$ ont respectivement la valeur des symboles logiques (ET, OU).

4.545 - Fonctionnement du C.V.C. - Dialogue C.V.C. - C.V.A.

4.5451 - Vérification de la cohérence

Au cours d'un contrôle de cohérence, il peut se faire que le système $S'_i$ d'action en sortie soit plus restrictif que le système $S_i$ appliqué à l'entrée $S'_i < S_i$ : il y a donc incohérence.

Deux cas sont alors possibles :

A) Toutes les variables ne sont pas représentées dans le système $S'_i$. Cela signifie qu'il existe au minimum une variable qui n'a aucune action possible en sortie. Les actions autorisées par le C.V.A. avec $N_\beta$ ne sont pas toutes compatibles. Pour définir un pas $\gamma$ il faut donc que le C.V.A. autorise un plus grand nombre d'actions. Le système $S_i$ doit donc être enrichi. Le plus simple consiste à considérer $N_\beta + 1$ pas $\beta$ (ce qui aura pour effet d'autoriser en supplément toutes les actions validables à $N_\beta + 1$ et par conséquent d'enrichir le système $S_i$ qui devient $S_i^{+1}$).

Il faut recommencer une nouvelle vérification de cohérence qui donnera en sortie $S'^{+1}_i$.

* Si $S'^{+1}_i = S^{+1}_i$ le système est cohérent et l'on procèdera à l'élimination d'une des deux actions pour les variables ayant leurs deux actions validées dans le système $S'^{+1}_i$ (voir en 4.5452).

* Si $S'^{+1}_i < S^{+1}_i$ il y a incohérence, alors on est ramené aux mêmes conditions qu'avec $S'i < S_i$.

B) Il y a incohérence, mais toutes les variables sont représentées dans le système d'action $S'_i$.

Autrement dit un système d'action complet plus restreint que celui présenté à l'entrée du C.V.C., est possible en sortie. Il importe donc de savoir si ce système restreint comporte toujours des actions compatibles, en faisant une nouvelle vérification de cohérence sur ce système $S'_i$ ou obtient, en sortie du C.V.C. le système d'actions $S''_i$, c'est ce qu'on appelle une vérification de cohérence au 2ème niveau.

Les cas suivants sont alors possibles :

* $S'_i = S''_i$ le système est cohérent, il faut procéder comme pour $S_i^{+1} = S_i^{+'1}$ ;

* $S''_i < S'_i$ le système est incohérent, nous sommes ramenés à la même procédure que pour $S'_i < S_i$.

Au point de vue nombre de vérifications de cohérence en cascade, le cas le plus défavorable est celui où les deux actions des n variables figurent dans le système $S_i$. Il se peut alors que n vérifications en cascade (voir fig. 4545a) soient nécessaires avant détection de cohérence ou d'incohérence (dans l'hypothèse ou chaque vérification de cohérence ne correspond qu'à la suppression d'une seule action selon une seule variable). Ces n vérifications donnent la limite supérieure du temps de fonctionnement du C.V.C.

4.5452 - Intervention des hiérarchies intervariables et interactions

Si une vérification de cohérence laisse deux actions possibles selon une ou plusieurs variables, il faut tenter de définir un pas $\gamma$ en fonction de la hiérarchie des variables et des actions.

Il faut donc supprimer une action sur toutes les variables ayant deux actions validées suivant le critère des hiérarchies. Pour respecter simultanément les préférences données par les hiérarchies, la méthode consiste à supprimer en premier lieu l'action classée seconde en hiérarchie interactions sur la variable classée première en hiérarchie intervariables. Après vérification de cohérence, trois cas peuvent se présenter :

a) le système $S_i$ qui ne compte plus qu'une action par variable est cohérent ($S_i = S'_i$). Alors le vecteur $\vec{\gamma}$ est complètement défini ;

b) il y a au moins une variable qui n'a aucune action permise. Selon la hiérarchie d'action établie, on supprime l'autorisation d'action 1, l'action 0 devenant la seule permise. Si l'échec se renouvelle, il faut reprendre le décomptage des C.V.A. c'est-à-dire considérer $N_\beta + 1$ pas $\beta$. Sinon on est ramené soit au premier, soit au troisième cas ;

c) deux actions sont permises selon une ou plusieurs variables ; il faut à nouveau faire un choix selon la hiérarchie. En effet le choix qui vient d'être fait "ne contrôle" aucune des variables qui ont encore deux actions permises puisque leurs deux actions étant permises elles ne subissent aucune contrainte.

Inversement, chaque action des variables qui ont encore deux actions permises ne peut "contrôler" à elle seule les actions des variables qui n'ont qu'une seule action permise. En effet supposons (fig. 4545b) permises les actions $a_1$, $a_0$, de la variable a et $b_0$ de la variable b c'est-à-dire que les sorties $a'_1$, $a'_0$ et $b'_0$ soient validées. Cela entraîne sur l'élément de matrice de C.V.C. M [ab] la présence de l'autorisation des couples $(a_1, b_0)$ et $(a_0, b_0)$ c'est-à-dire que l'on a selon nos notations $\overline{\text{int}\ (a_1, b_0)} = 1$ et $\overline{\text{int}\ (a_0, b_0)} = 1$.

Que l'on supprime l'une quelconque des deux actions $a_1$ ou $a_0$ la validation de $b'_0$ restera toujours assurée par la présence de l'un de ces deux couples. Il en résulte qu'une variable de l'ensemble de celles qui ont deux actions permises ne peut contrôler que d'autres variables du même ensemble. En conséquence s'il y a échec qprès un essai des actions 0 ou 1 d'une variable ceci ne peut jamais provenir des choix antérieurs.

En conclusion, pour installer une hiérarchie sur n variables ayant deux actions possibles, il ne peut y avoir que deux n vérifications de choix (chaque variable demandant au maximum deux vérifications d'actions). L'algorigramme de la fig. 4545c représente les enchaînements possibles des diverses opérations définies ci-dessus.

4.5453 - Exemple numérique de fonctionnement du C.V.C.

Considérons l'exemple du paragraphe 4.543 (fig. 45r et tableau 4543 D dans le tome texte).

Dans ce problème :

$N_\beta = 8$ et les actions autorisées sont X = 0, X = 1, Y = 0, Y = 1, Z = 0, Z = 1 ;

supposons que la hiérarchie intervariables soit par ordre décroissant : Y X Z, et que la hiérarchie interactions soit X = 0, Y = 1, Z = 0.

Introduisons le système Si à l'entrée du C.V.C. (fig. 4545d).

D'après la position de la situation de départ par rapport aux contraintes, le C.V.C. recevra de la part du C.A.S. l'interdiction (Y = 1, Z = 1) (fig. 45r3).

Le système $S'_i$ en sortie du C.V.C. est identique à $S_i$ donc il y a cohérence. Plusieurs actions par variable sont possibles dans le système $S'_i$. Il faut donc en éliminer par interrogation des hiérarchies.

Le C.V.C. va donc valider l'action 1 (1ère en hiérarchie intervariables) sur la variable Y (classée 1ère en hiérarchie interactions), voir fig. 4545c. Or le système $S'_{i+1}$ de sortie est inférieur au système $S_{i+1}$ d'entrée. Il y a incohérence. En effet le fait de supprimer Y = 0 a entraîné la suppression de Z = 1. Or toutes les variables étant représentées dans le système $S'_{i+1}$ il faut vérifier si ce système restreint est cohérent (fig. 4545f). On a $S'_{i+1} = S''_{i+1}$, le système est cohérent, mais il reste encore deux actions possibles sur la variable X. Le C.V.C. va donc valider l'action 0 (classée 1ère en hiérarchie interactions) sur la variable X et on va vérifier que le nouveau système d'actions est cohérent (fig. 4545g). Comme il ne reste qu'une seule action possible sur chacune des variables, le vecteur $\vec{\gamma}$ est complètement défini. Il a pour composantes : X = 0, Y = 1, Z = 0.

## 4.6 - *ANALOGIE entre l'ARCHITECTURE LOGIQUE d'une "MEMOIRE ACTIVE" et la NEUROPHYSIOLOGIE (voir tableau 4.6a)*

Nous savons que les systèmes neurophysiologiques présentent un système afférent formé par les nerfs qui véhiculent l'information jusqu'aux centres récepteurs et centres d'intégration.

Ce système est représenté sur la machine de laboratoire M 2 par le Centre d'inscription C I et le panneau d'affichage. Sur le combinateur S.N.C.F., le système afférent est figuré par les matrices d'affectation, de pondération et d'affichage des hiérarchies.

Les centres neurophysiologiques ont des fonctions de mémorisation, d'association (par les voies d'association, les noyaux d'association, les aires de projection) d'inhibition (aires suppressives et fibres parapyramidales), de liaison (noyaux, relais du cerveau), de coordination (système myostatique, formation réticulée).

Sur M 2 ces fonctions sont prises en compte par les centres d'association de situations, d'association d'actions, de liaisons et de coordination, centres qu'on retrouve sous d'autres noms dans le combinateur S.N.C.F. (C.A.S., C.V.C., C.V.A., Sélection, Interface, timing etc...).

Le système afférent formé par les deutoneurones moteurs des muscles chez l'être vivant est figuré sur la "Mémoire Active" par la logique de commande de la machine à écrire électrique.

## 4.7 - REALISATION PHYSIQUE des CENTRES

### 4.71 - Le Centre d'Association de Situations (C.A.S.)

#### 4.711 - Etude théorique du C.A.S.

##### 4.7111 - Analyse du principe théorique

###### 4.71111 - Généralités

Les bascules ne peuvent être bloquées que par groupe, en fonction de la pondération des cantons.

*Remarque :*

Pour suivre le déplacement d'un point dans le réseau maillé, il suffit de suivre l'évolution des coordonnées x et y de ce point. Il est donc possible de pouvoir représenter un réseau maillé simplement par ses axes. De plus, il faut avoir la possibilité de rendre dépendantes les projections x et y, car celles-ci sont les composantes du vecteur v donnant la position géographique du point M (fig. 47111a).

###### 4.71112 - Conditions fonctionnelles

Pour envisager la représentation d'un réseau maillé à partir de ses axes, il faut être capable physiquement (ou plus exactement électroniquement) de réaliser les fonctions du réseau maillé théorique que nous avons défini précédemment, à savoir :

1 - déplacement du point M par progression simultanée des vecteurs coordonnées de ce point (x et y par exemple) dans une zone sans contrainte ;

2 - prise en compte par le réseau des zones d'inhibition (contraintes) ;

3 - contournement de la zone de contrainte par le point M en arrêtant la progression de l'une ou l'autre des composantes du vecteur v (fig. 47111b).

Exemple :

Dans la zone 3 -, la composante x ne progresse pas, alors que y avance.

###### 4.71113 - Conception logique (voir fig. 47111c)

Proposons-nous de réaliser le réseau maillé plan de la fig. 45a ayant pour axe x et y en évitant de réaliser électroniquement toutes les mailles.

Nous avons vu que chaque axe est représentatif d'un itinéraire sur lequel circulera une variable (un train). Ayant évalué à 14 le nombre de "cantons" de chaque itinéraire, nous diviserons chacun des axes x et y en 14 segments. Notons que chacun de ces segments peut se subdiviser (se quantifier) au maximum en 31 valeurs élémentaires, chacune étant significative du poids unitaire affecté au segment. La somme des poids unitaires pour un segment, s'appellera "pondération du segment" ou "pondération du canton". Si cette somme est par exemple de 13, on conviendra de dire que la pondération du segment vaut 13.

Sur le plan fonctionnel, le réseau maillé de la fig. 45a peut se représenter de la façon suivante (voir fig. 47111c) :

a) Par deux chaînes dites "maîtresses" de 14 compteurs électroniques en série, une pour l'axe x, l'autre pour l'axe y que l'on appelle respectivement "maître x" et "maître y". Chaque compteur dit compteur de Progression Libre (CPL) est lui-même formé de cinq bascules en série qui permettent de coder en binaire le chiffre 31 soit $(2^5 - 1)$ (voir fig. 47111d).

   Toutes les bascules d'une chaîne étant en position "1", par décomptage successif des compteurs on peut représenter le déplacement d'un signal représentant lui-même l'extrémité du vecteur projection sur un axe du point M qui se déplacerait dans le réseau maillé théorique.

   Pouvant remettre sélectivement à "1" un groupe homogène de compteurs, il est possible d'initialiser la position d'un point sur un axe et de lui donner le module en "poids" du parcours autorisé (voir fig. 47111e).

   Sur l'ensemble de cette figure, les compteurs du segment 4 au segment 12 étant chargés, ils représentent le parcours de la variable x. Ainsi peut-on fixer la situation de départ (SD sur le segment 4, premier compteur chargé) et la situation d'arrivée (SA sur le segment 12, dernier compteur chargé). D'autre part la somme des poids enregistrés dans les différents compteurs représentera le nombre de pas que devra faire la variable x pour aller de SD à SA (38 dans le cas de la fig. 47111e).

   Sur chaque axe "maître x" et "maître y", on peut représenter de la sorte l'évolution des projections du point M par le déplacement d'un signal (un créneau d'horloge) qui, à chaque front descendant remet à "0" les bascules qui étaient en position "1". Il se produit ainsi un décomptage des compteurs. Or, pour satisfaire à la condition fonctionnelle 1) du § 4.71112 (dépendances des projections du point M), on "attaque" simultanément "maître x" et "maître y" par la même horloge. Le décomptage des deux axes se fait en synchronisme, ce qui assure la progression simultanée des projections du point M (voir fig. 47111c).

b) Le réseau maillé peut aussi se représenter par deux chaînes dites "d'inhibition" de 14 compteurs électroniques en série, l'une pour l'axe x et l'autre pour l'axe y qui permettent d'enregistrer le numéro du canton inhibé le plus péjorant (voir fig. 47111c).

Chaque compteur dit "compteur de contraintes" (CC) est formé de quatre bascules qui permettent de coder le numéro de canton le plus élevé soit 14 ($2^4 - 1 > 14$).

L'enregistrement de ces contraintes se fait de la façon suivante : on part de l'axe Y et du canton de numéro le plus élevé (14 pour la machine). Sur la ligne Y, on "interroge" tous les cantons X et on retient le numéro du canton X en contrainte, le plus élevé (voir fig. 47111g). Ainsi pour la ligne nY, on enregistrerait sur le compteur de contrainte CC correspondant au canton n de l'axe Y, le poids P (numéro du canton contraint le plus élevé sur cette ligne nY).

Avec la zone de contrainte hachurée de la fig. 47111c on enregistrerait par exemple sur la chaîne d'inhibition Y les valeurs (12, 12, 11, 10, 10, 9) correspondant au plus grand numéro de canton inhibé pour chaque ligne Y. Il faut noter que le passage de la ligne nY à la ligne (n - 1) Y se fait par un balayage successif des lignes de la "matrice des contraintes".

Le même raisonnement étant applicable pour l'axe X, on peut également connaître la position des contraintes dans un réseau maillé par enregistrement sur deux axes seulement. Ces chaînes d'inhibition permettent de satisfaire à la deuxième condition formelle du § 4.71112 la prise en compte des zones d'inhibition.

c) Le réseau maillé peut enfin être représenté par deux chaînes dites "esclaves" de 14 compteurs électroniques en série, l'une pour l'axe X et l'autre pour l'axe Y qui permettent de contourner la zone de contrainte (condition fonctionnelle 3). Chaque chaîne sera appelée (esclave X) et (esclave Y).

Ces chaînes sont dites "esclaves" car leur décomptage est tributaire de la position du point M donnée par les chaînes dites "maîtresses". Lorsque le point M atteint un côté d'obstacle ou son alignement, la chaîne esclave cesse de "décompter" tandis que la chaîne maîtresse continue. Le décomptage de la chaîne esclave reprend lorsque le point M a complètement contourné l'obstacle et qu'il n'y a plus de gêne dans la progression simultanée des projections du point M.

Il faut souligner que les chaînes maîtresse et esclave d'un même axe sont "chargées de la même façon" (poids identiques sur les mêmes numéros de cantons) et que c'est seulement le décomptage de l'esclave qui est "subordonné" à celui de la "maîtresse". Il en résulte que, comme pour la chaîne "maîtresse, la chaîne "esclave" possède des compteurs à cinq bits, compteurs qui sont appelés : "compteurs de progression subordonnée". (C.P.S.).

4.7112 - Fonctionnement

Nous rappelons que le rôle du C.A.S. est de fournir les quatre grandeurs suivantes :

Nβ XO, Nβ XI, Nβ YO, Nβ YI et que d'autre part un obstacle peut être contourné par-dessus (CHS) et par-dessous (CHI).

4.71121 - Obtention des chemins à partir des chaînes

Un chemin est obtenu par la combinaison de la chaîne "maîtresse" d'une variable avec la chaîne "esclave" de l'autre. Ainsi sur la fig. 47111c le chemin supérieur CHS sera obtenu par "maître x" et "esclave y". Le CHI sera donné par "maître y" et "esclave x".

4.71122 - Parcours C.A.S.

Cet exemple a pour but de familiariser le lecteur avec le principe du parcours C.A.S. Nous en énoncerons la théorie au paragraphe suivant.

Considérons la fig. 47111c et supposons que la situation de départ soit SD (x = 3, y = 5) et la situation d'arrivée SA (x = 14, y = 14). La zone de contrainte sera représentée par l'aire hachurée.

Supposons que les itinéraires x et y soient chargés, c'est-à-dire que l'on ait mémorisé les "poids" des segments compris entre trois et quatorze inclus pour x et cinq et quatorze pour y. Ici on a supposé que chaque segment était pondéré à 1. Supposons aussi que les contraintes soient enregistrées, ce qui signifierait que les compteurs CC aient été chargés avec le plus grand numéro de canton interdit pour la ligne ou la colonne considérée. Supposons enfin que les compteurs d'éloignement fictif de but soient à zéro.

Notre propos est d'effectuer un parcours C.A.S. afin de déterminer les paramètres Nβ XO, Nβ X1, Nβ YO, Nβ Y1. Comme il a déjà été dit, l'exploration β est lancée à partir de la situation d'arrivée SA.

Les chaînes étant chargées, il va falloir compter le nombre de temps d'horloge nécessaire pour les remettre à zéro. Chaque fois qu'une chaîne sera remise à zéro, le nombre de coups d'horloge émis jusqu'alors sera enregistré et leur nombre servira à définir les quatre paramètres recherchés, moyennant un traitement à la suite du décomptage.

Convenons de représenter le point M par ses composantes dans l'ordre x, y :

M (x = 14, y = 13) donnera M (14, 13)

Evolution du point M

- de M (14, 14) à M (13, 13)

L'horloge commune aux deux axes et aux deux chaînes de chaque axe décomptera le poids de 1 sur x 14 et y 14. Nous considérons qu'au moment ou le point M est entré sur un segment, il doit parcourir tout ce segment, c'est-à-dire que l'horloge devra décompter le poids total enregistré sur le compteur correspondant à ce segment.

- De M (13, 13) on ne peut passer en M (12, 12) à cause de la contrainte. L'exploration C.A.S. permet d'essayer en même temps les deux chemins a priori possibles, le CHS et le CHI. Convenons de repérer par M' le point M empruntant le CHS et par M" le point M qui empruntera le CHI.

- De M (13, 13) à M' (12, 13)

L'horloge décomptera le poids de 1 sur MX, par contre, elle ne décomptera pas de bit sur EY. Lorsque M' arrive sur le segment 12 de l'axe X, le compteur de contrainte CCX12 est chargé à 12. Ceci veut dire que sur la colonne 12 le segment 12 en Y est interdit. Cette situation entraîne le blocage de l'esclave Y du segment 12. L'horloge aura émis deux créneaux, mais il n'y aura qu'un bit de décompté sur EY. Cela explique pourquoi le point M' conservera 13 en ordonnée.

- De M' (12, 13) à M' (11, 13)
  - décomptage de 1 sur EX,
  - EY reste toujours bloqué puisque le CCX11 est chargé à 12 et empêche par conséquent EY de progresser.

- De M' (11, 13) à M' (10, 13)
  - décomptage de 1 sur EX,
  - blocage de EY.

- De M' (10, 13) à M' (9, 12)
  - décomptage de 1 sur EX,
  - décomptage de 1 sur EY, Le CCX est chargé à 11, ce qui entraîne un blocage de EY sur le segment 11, or le segment 12 n'ayant pas été décompté, peut l'être.

- De M' (9, 12) à M' (8, 11)
  - décomptage de 1 sur EX,
  - décomptage de 1 sur EY.

Le CCX8 étant chargé à 9, c'est seulement à partir du segment 9 que EY est bloqué. Or, les poids des segments 11 et 10 n'ayant pas été décomptés, il est possible de le faire.

Le même mécanisme est applicable pour le CHI avec M".

Finalement on peut représenter les quatre décomptages comme suit (fig. 47111c) :

MX (en rouge) : sera remis à zéro au bout de 11 temps d'horloge ;

MY (en vert) : sera remis à zéro au bout de 9 temps d'horloge ;

EX (en bleu) : sera remis à zéro au bout de 14 temps d'horloge ;

EY (en gris) : sera remis à zéro au bout de 12 temps d'horloge.

Ces nombres de temps d'horloge étant enregistrés, il reste à les traiter pour en tirer les quatre paramètres Nβ X0, Nβ X1, Nβ Y0, Nβ Y1.

Sur la fig. 47111c on voit qu'il faudrait attribuer les valeurs des paramètres de la façon suivante :

Nβ X1 = 13 (si y = 0) mais Nβ X1 = 11 (si Y = 1).

En effet si X (à partir de la situation de départ SD) progressait d'une case, le front d'onde atteindrait cette nouvelle position de X en 13 temps (ou pas) si Y = 0 et 11 pas si Y = 1.

Nβ Y1 = 11

Même explication que pour Nβ X1

Nβ Y0 = 12

Si Y reste sur place (fait l'action 0), le front d'onde peut atteindre cette position au minimum en 12 pas par le CHS.

Nβ X0 = 12

Si X restait sur place, cette position pourrait aussi être atteinte en 12 pas et non pas en 14.

Ce dernier exemple montre qu'il faudra traiter les valeurs décomptées dans les chaînes pour chiffrer les quatre paramètres(1). Ce traitement dépend d'ailleurs étroitement de la position du point de départ SD par rapport à l'obstacle.

4.71123 - Etude théorique du traitement des résultats donnés par les chaînes "maître" et "esclave" afin de définir Nβ X0, Nβ X1, Nβ Y0, Nβ Y1.

4.711231 - Généralités

Le but de cette étude est de déterminer le nombre minimum de pas β à transférer dans le C.V.A. pour les deux actions de chaque variable en fonction des résultats obtenus par "un parcours C.A.S."

Nous avons démontré au § précédent que ces valeurs dépendaient sensiblement de la position du point de départ SD par rapport à l'obstacle. Ceci nous amène à définir tous les cas possibles de position d'un point par rapport à un obstacle.

4.711232 - Terminologie

1 - Cas singulier

Un point M extérieur à l'obstacle peut se trouver dans les zones particulières suivantes (voir fig. 47111h).

ALX, ALY = alignement X, Y

CX, CY = côté X, Y

ECX, ECY = extrémité de côté X, Y.

2 - Notation

Les chaînes maîtresse et esclave seront notées :

MX : maître X

EX : esclave X

MY : maître Y

EY : esclave Y

(1) Ces considérations feront l'objet du paragraphe suivant.

Lorsqu'une chaîne sera complètement remise à zéro, on dira que le maître ou l'esclave de cette chaîne "est arrivé".

En conséquence le symbole :

MX veut dire : le "maître X est arrivé"
EX " " : l'esclave X " "
MY " " : le "maître Y " "
EY " " : l'esclave Y " "

< signifie : est arrivé avant
$\leqslant$ " : est arrivé avant ou en même temps
> " : est arrivé après
$\geqslant$ " : est arrivé après ou en même temps

EX > MX veut dire l'esclave X est arrivé après le maître Y

$\overline{EX}$ veut dire l'esclave X "n'est pas arrivé".

EX $\cap$ MY veut dire l'esclave X et le maître Y sont arrivés

EX $\cup$ MY veut dire l'esclave X ou le maître Y est arrivé

D sera un opérateur qui retarde d'un temps la variable considérée dans un système séquentiel.

De la connaissance de l'ordre d'arrivée de MX, MY, EX, EY et de l'existence ou de l'absence de ALX, ALY, ECX, ECY, CX, CY, ACX, ACY on doit en déduire la forme du front d'onde et le chemin choisi dans le C.A.S.

4.711233 - Etude théorique

A) Recherche du chemin le plus court

Etant donné que dans le C.A.S il n'y a qu'une seule zone de contrainte, la recherche du trajet optimal revient à faire le choix entre un chemin supérieur et un chemin inférieur. Lorsque l'un des fronts d'onde correspond à l'un de ces chemins, il détermine le chemin le plus court.

Par définition, on a toujours :

$MX \leqslant EX$

$MY \leqslant EY$

a) Supposons CHS < CHI

Cela veut dire que :

MAX (MX, EY) < MAX (MY, EX)

Examinons alors tous les cas possibles :

1 - MY < EX

MAX (MX, EY) < MY => $\begin{cases} EY < MX < MY \\ MX < EY < MY \end{cases}$

Comme dans les deux cas EY < MY est impossible, l'éventualité MAX (MX, EY) < MY est à rejeter.

Donc MY < EX => MAX (MY, EX) = EX

2 - MAX (MX, EY) < EX

* EY < MX

MY < EY < MX < EX

Ce qui donne MX < EX donc c'est vérifié

* MX < EY => EY < EX

3 - EX < MY => MX < EX < MY < EY

EY < MY impossible

4 - MX < EY

* MY < EX => MX < EX, EY < MY

d'où EY < MY : impossible

* EX < MY > MX < EX < MY < EY

d'où EY < MY : impossible

5 - EY < MX

MY < EY < MX < EX

=> EY < EX

Ces relations étant symétriques en X et Y il en résulte la relation CHI < CHS => EX < EY.

Récapitulation :

CHS < CHI <=> EY < EX
CHI < CHS <=> EX < EY

B) Relations définissant la position du point d'arrivée par rapport aux fronts d'onde β.

Dans la figure 47711j, on a représenté en vert le chemin supérieur et en rouge le chemin inférieur. Les résultats de MX, MY, EX, EY sont également figurés selon la position du point d'arrivée.

4.7113 - Relations définissant toutes les situations possibles

4.71131 - Généralités

Choisissons la situation :

On a dans ce cas CHS < CHI

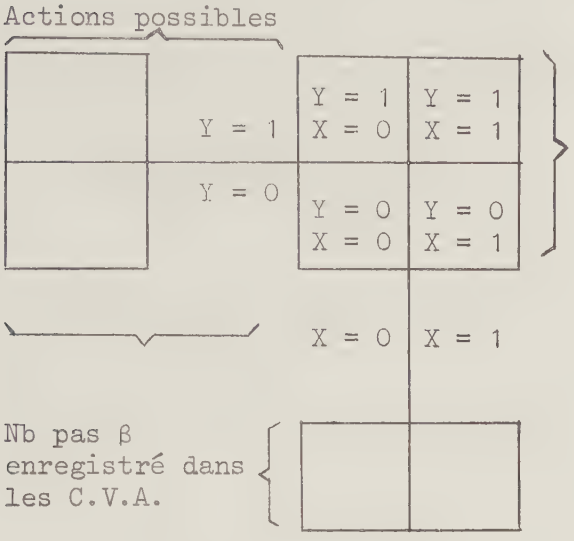
donc EY < EX

D'après la fig. 47111j on a EY < MX. Cette relation étant plus restrictive seule sera conservée :

EY < MX

Si le front d'onde arrive au bout de a pas β, l'action X = 1, sera possible au bout de a pas β.

On peut représenter cela de la façon suivante :




Nb de pas β nécessaires pour que les couples d'action 00,01,10,11 soient possibles.

Une étude exhaustive montre qu'il existe 23 cas possibles envisagés dans les pages suivantes (cas n° 1 à 23).

4.71132 - Etude des cas possibles (voir tableaux 4.71132)

4.71133 - Remarques

Dans les cas 10 et 21 on interdit la case 00 pour la raison suivante : au temps a on permet les mouvements X = 0, Y = 0 puisqu'en faisant les couples d'actions X = 0, Y = 1 et X = 1, Y = 0 on atteint le front d'onde. On affirme donc que le couple (X = 0, Y = 0) permet d'atteindre lui aussi le front d'onde au bout de a pas β. Or le front d'onde n'atteindra ce point là qu'un pas plus tard.

On voit donc que l'interdiction de stationner ne doit apparaître que si a, est le nombre le plus petit que le C.V.A. ait eu à enregistrer jusque là et que d'autre part, cette interdiction doit être annulée un pas plus tard. Cela est fait par le C.V.A. au cours de l'élaboration du pas γ.

4.71134 - Analyse des actions et interdictions

Connaissant toutes les situations possibles données par le paragraphe 4.71132 il est possible de déterminer les fonctions logiques correspondant à chaque cas ou groupe de cas.

A) Les Actions

L'action X = 1 est possible dans tous les cas, dès que l'un des deux fronts d'onde est arrivé, excepté en 15, 17 et 23.

En 15, il existe un côté de contrainte. L'action X = 1 ne sera donc jamais permise.

En 17 et 23, X = 1 sera possible seulement avec l'arrivée du front d'onde inférieur.

Cela peut se traduire par :

$$(X = 1) = \left\{\left[(EX, MY) \cup (EY, MX)\right] \cap \left((15) \cup (17) \cup (23) \cup \left[\overline{ALY} \cap (EX \ MY)\right]\right)\right\}$$

Or $(15) \cup (17) \cup (23) = (\overline{ALY \cup CY})$

Finalement :

$$(47113.41)\ (X = 1) = \left\{\left[(EX, MY) \cup (EY, MX)\right] \cap (\overline{ALY \cup CY})\right\} \cup \left[ALY \cap (EX \cap MY)\right]$$

Le C.A.S. étant symétrique en X et Y il est facile d'obtenir (Y = 1) en remplaçant X par Y et Y par X dans l'expression (Y = 1)

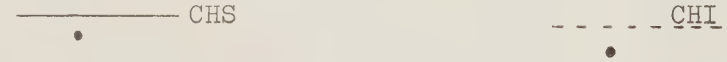
$$(47113.42)\ (Y = 1) = \left\{\left[(EY, MX) \cup (EX, MY)\right] \cap (\overline{ALX \cup CX})\right\} \cup \left[ALX \cap (EY \cap MX)\right]$$

X = 0 est toujours possible un temps après la validation de X = 1, mais il existe des cas où il est validé avant ou en même temps.

$$(X = 0) = D\ (X = 1) \cup (2) \cup (12) \cup (15) \cup (5) \cup (8)$$

$$\cup (10) \cup (21) \cup (23) \cup (17) \cup (18)$$

Il est à remarquer que tous ces cas se ramènent aux situations suivantes :




Cela se traduit par :

$$EY > MX \quad \text{et} \quad (EY \cap MX) \leqslant (EX \cap MY)$$

$$\text{ou } EX > MY \quad \text{et} \quad (EX \cap MY) \leqslant (EY \cap MX)$$

$(EY \cap MX) \leqslant (EX \cap MY)$ signifie que CHS < CHI. Il aurait été possible de prendre EY < EX. Mais la relation $(EY \cap MX) \leqslant (EX \cap MY)$ est électroniquement plus facile à détecter.

On déduit :

(47113.43)

$$(X = 0) = D\ (X = 1) \cup \left\{(EY > MX) \cap \left[(EY, MX) \leqslant (EX, MY)\right]\right\} \cup \left\{(EX < MY) \cap \left[EX, MY \leqslant EY, MX\right]\right\}$$

Par permutation X et Y, on déduit :

(47113.44)

$$(Y = 0) = D\ (Y = 1) \cup \left\{(EX > MY) \cap \left[(EX, MY) \leqslant (EY, MX)\right]\right\} \cup \left\{(EY < MX) \left[EY, MX < EX, MY\right]\right\}$$

B) Les interdictions

* (int 00) = (10) $\cup$ (21) mais (21) $\subset$ (10)

(47113.45) $\boxed{\text{(int 00)} = (EY > MX) \cap (EX > MY) \cap (EX = EY)}$

(int 10) = (11) $\cup$ (12) $\cup$ (15)

(47113.46) $\boxed{\text{(int 10)} = CY \cup ECY}$

(int (01) = (13) $\cup$ (14) $\cup$ (16)

(47113.47) $\boxed{\text{(int (01)} = CS \cup ECX}$

(int 11) = (15) $\cup$ (16) $\cup$ (21) $\cup$ (22) $\cup$ (23)

(47113.48) $\boxed{\text{(int 11)} = (CY \cap \overline{ECY}) \cup (CX \cap \overline{ECX}) \cup (ALX \cap ALY)}$

Les équations (47113.41) à (47113.44) sont fondamentales et définissent respectivement les quatre paramètres Nβ X 1, Nβ Y 1, Nβ XO, Nβ YO que l'on se proposait d'évaluer au début de ce chapitre.

Les quatre autres équations (47113.45) à (47113.48) sont également fondamentales car elles permettent de déterminer les interdictions à transférer dans le CVC compte tenu de la position du point de départ par rapport aux contraintes. Pour interpréter ces équations, il est nécessaire de conserver un système logique qui soit capable d'exploiter les valeurs inscrites dans les chaînes MX, MY, EX et EY. Cela fait l'objet d'une plaque nommée : LOGIQUE D'EXPLOITATION C.A.S. expliquée au paragraphe 4.713.

4.71135 - Conclusion

Le fonctionnement du C.A.S. peut se décomposer en deux phases :

1) chargement des données (qui se fait en trois temps)

- chargement des contraintes,
- chargement de l'itinéraire X
- chargement de l'itinéraire Y

2) parcours C.A.S. qui permettra d'obtenir

* les quatre paramètres fondamentaux d'action :

  - Nβ X O
  - Nβ X 1
  - Nβ Y O
  - Nβ Y 1

* les renseignements relatifs à la position du point M par rapport aux obstacles, ce qui permettra de définir les interdictions d'actions :

  - (int 00)
  - (int 01)
  - (int 10)
  - (int 11).

4.712 - Réalisation physique du C.A.S.

4.7121 - Généralités

D'après la théorie, nous avons vu qu'il faudrait réaliser $C_n^2$ C.A.S. (n étant le nombre de variables). Afin d'économiser des éléments logiques et vu que le principe d'exploration parallèle donne des temps de calcul très courts, il a semblé intéressant de ne réaliser qu'un seul centre physique et de l'utiliser séquentiellement pour tous les couples de variables prises deux à deux.

Avec une machine à huit variables, il est possible de ne construire qu'un seul C.A.S. au lieu de $\frac{8 \times 7}{2} = 28$(1), on réalise donc un gain de 28 sur le matériel mais en perdant un facteur 28 sur le temps de calcul.

Malgré tout, cette méthode comme nous le verrons au § suivant, donne un temps global inférieur à une minute (limite que nous avons adoptée pour construire une machine travaillant en temps réel).

4.7122 - Evaluation du temps de calcul

Le C.A.S. doit prendre en compte quatorze cantons susceptibles d'avoir chacun le poids maximum de 31. Le C.A.S. peut donc se représenter par un quadrillage (14 x 31) x (14 x 31) soit (434 x 434). L'exploration C.A.S. prenant en compte l'éloignement fictif de but de valeur maximum 960, il en résulte que pour effectuer un parcours C.A.S., il faut au minimum 960 + 434 = 1 394 temps d'horloge.

Ces temps d'horloge étant contrôlés par un compteur binaire, il faudra $2^{11}$ bits = 2 048 pour prendre en compte le nombre 1 394 auquel s'ajoutent d'ailleurs des temps morts.

Si on fonctionne à deux MHz (fréquence permise par la technologie adoptée), il faudra 2 048 x $0{,}510^{-6}$ environ 1 ms pour accomplir une exploration C.A.S. Avec 91 C.A.S. travaillant séquentiellement, il faudra 91 ms.

Compte tenu du temps de traitement dans les C.V.A. et C.V.C. ainsi que du temps de définition du pas $\gamma$, on peut estimer qu'il faudra au total dans le cas le plus défavorable, 150 ms pour élaborer le premier pas $\gamma$(2). Ce temps étant encore nettement inférieur à 1' (délai maximum imposé pour travailler en temps réel), nous pouvons donc nous permettre d'utiliser séquentiellement un seul C.A.S. physique.

(1) Avec quatorze variables, il faudrait $\frac{13 \times 14}{2} = 91$ C. A. S.

(2) La définition du pas $\gamma$ donne déjà des indications précieuses sur l'orientation de la trajectoire dans l'espace n dimensionnel et fournit les premiers éléments de la stratégie envisagée par la machine. Ceux-ci pourront servir à redonner les premiers ordres aux mobiles afin qu'ils respectent bien la stratégie précédemment définie.

4.7123 - Réalisation du C.A.S.

L'ensemble du C.A.S. réalisé est constitué par quatorze plaques (repérées de A 19 à A 32) représentant l'itinéraire lié à l'axe X et les contraintes qui lui sont associées (A 19 à A 25). De même pour l'itinéraire lié à l'axe Y et il y a sept plaques (A 26 à A 32).

Chaque module mémorise ainsi les informations relative à la portion d'un itinéraire situé sur deux cantons successifs.
(voir fig. 4712a)

4.7124 - Structure d'une plaque C.A.S. (fig. 4712b)

Une plaque C.A.S. est formée de :

- deux compteurs de progression β libre CPL 5 bits 0 à 31
- deux compteurs de progression β subordonnée CPS 5 bits 0 à 31
- deux compteurs de contrainte CC 4 bits 0 à 15.

Les trois compteurs d'un canton (1 CPL + 1 CPS + 1 CC) sont décomptants asynchrones.

4.71241 - Le CPL

Ce compteur est positionné à 1 (partout) avant le chargement, par le connecteur 8.

Le chargement se fait en remettant à 0 sélectivement certaines bascules par 19, 13, 11, 20, 12. Celui qui consiste à décompter "la pondération" du canton est commun avec le CPS.

L'horloge 10 qui est validée après passage à 0 du compteur d'éloignement fictif de but permet le décomptage du poids déjà inscrit.

Le décomptage sur le CPL ne peut commencer que si le CPL précédent a bien terminé le sien (connecteur 6). Pour commander le décomptage du CPL suivant, le connecteur 5 détecte l'état 0 du compteur. Il faut également détecter l'état 1 afin de commander le décomptage du compteur de contrainte de l'autre axe. Cette opération est faite par 39 et 33.

4.71242 - Le CPS

Ce compteur est également positionné à 1 partout avant le chargement par huit. Le chargement est aussi effectué en remettant sélectivement à zéro certaines bascules par 19, 13, 11, 20 et 12. L'autorisation de décomptage est donnée par l'horloge 10 après passage à 0 du compteur d'éloignement fictif de but.

La commande de décomptage a lieu si :

- le CPS précédent est à 0 et lui-même $\neq 0$
- le CC = 0

La détection de l'état 0 est faite :

* par 25 pour décomptage du CPS suivant
* par 30 pour l'autorisation de l'état 1 du CPS précédent
* par 18 pour ET câblé général.

4.71243 - Le CC

Avant le chargement de la contrainte, ce compteur est positionné à 1 partout, par 8.

Le chargement de la contrainte Y se fait par une RAZ sélective par 35, 34, 37, 36 et sur autorisation de CCY. Par contre le chargement de la contrainte X se fait par une RAZ générale sur autorisation de 14 ou 38.

Le décomptage est autorisé par l'horloge 22 qui est :

- validé pendant le chargement des contraintes s'il s'agit de CCX ;
- validé pendant le chargement de l'itinéraire ;
- validé pendant la progression β après le passage à 0 du compteur d'éloignement fictif de but.

Le déclenchement du décomptage est donné par 36 s'il s'agit de CCX.

La commande de décomptage est donnée par 33 qui se trouve :

- validé pendant le chargement des contraintes si c'est CCX ;
- validé pendant le chargement de l'itinéraire avant de passer sur le canton arrivée ;
- validé pendant la progression β si l'autre axe, le CPL = 1 et le CPL précédent = 0.

La détection de l'état 0 se fait par 21 pour commander le décomptage du CPS.

La détection de l'état ≠ 0 se fait sur 27 lorsque le CPL précédent = 0.

4.7125 - Economie d'éléments logiques permise par la structure C.A.S. adoptée

Cette étude a pour but de montrer l'importance de la réduction du volume de l'électronique apportée par :

- la décomposition d'une trajectoire de l'espace en ses plans de projection,
- l'utilisation séquentielle d'un seul C.A.S.,
- l'adoption des chaînes maître et esclave, dans la réalisation physique du C.A.S.,
- l'introduction de segments pondérables sur les axes.

4.71251 - Réalisation d'un réseau maillé complet à quatorze dimensions

Chaque variable affectée à chacune des quatorze dimensions pouvant prendre $14 \times 31 = 434$ états, il faudrait un nombre Nb 1 impressionnant d'éléments pour réaliser l'hypervolume complet en logique câblée.

Si K est un coefficient multiplicateur > 1 qui représente le nombre d'éléments propres pour chaque hypervolume élémentaire à quatorze dimensions, il faudrait : $Nb\ 1 = K \times (434)^{14}$ éléments.

Soit $\boxed{Nb\ 1 = K \times 10^{37} \text{ éléments}}$

4.71252 - Réalisation d'un réseau maillé utilisant des C.A.S.

Pour quatorze dimensions, il faut $\frac{n\ (n - 1)}{2}$, soit :

$$\frac{14 \times 13}{2} = 91 \text{ C.A.S.}$$

Si N est le nombre d'états possibles par variable, pour réaliser un réseau maillé analogue à celui de la fig. 45a, il faut : $3\ N^2 + 2\ N$ éléments. Pour prendre en compte toutes les projections d'un espace à quatorze dimensions, il faudrait :

$$Nb\ 2 = (3\ N^2 + 2\ N)\ \frac{n\ (n - 1)}{2}$$

Application numérique :

$$Nb\ 2 = 91 \times (3 \times 434^2 + 2 \times 434)$$

$$\boxed{Nb\ 2 = 51\ .\ 10^6 \text{ éléments}}$$

4.71253 - Réalisation d'un réseau maillé utilisant un seul C.A.S.

$$Nb\ 3 = 3\ N^2 + 2\ N$$

Application numérique :

$$\boxed{Nb\ 3 = 56{,}5\ .\ 10^4 \text{ éléments}}$$

4.71254 - Réalisation d'un C.A.S. avec des chaînes "maître" et "esclave"

Il faudrait :

- quatre chaînes de 434 bascules chacune,
- deux chaînes de contrainte de 434 compteurs chacune. Un compteur de contrainte devrait être capable de coder 434 en binaire, et il faudrait donc neuf bascules par compteur.

Finalement :

$$Nb\ 4 = 4 \times 434 + 9 \times 2 \times 434$$

$$\boxed{Nb\ 4 = 9\ 548 \text{ éléments}}$$

4.71255 - Réalisation d'un C.A.S. avec chaînes "maître" et "esclave" dont les axes sont subdivisés en segments pondérables (cantons).

Bilan :

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| chaînes | MX | 14 x 5 = | 70 | éléments |
| " | EX | " | 70 | " |
| " | MY | " | 70 | " |
| " | EY | " | 70 | " |
| " | CCX | 14 x 4 = | 56 | " |
| " | CCY | 14 x 4 = | 56 | " |
| | | Total : | 392 | " |

En considérant qu'il faut multiplier par cinq ce nombre pour tenir compte des éléments logiques supplémentaires d'exploitation et de vérification, cela donne :

Nb 5 ≃ 2 000 éléments

4.71256 - Imputation des gains en éléments logiques

A) Gain apporté par la décomposition de l'espace :

$$G\ 12 = \frac{10^{37}}{51.10^{6}} \simeq 2.10^{29}$$

Il est à noter qu'en réalité ce gain doit être corrigé, étant donné qu'il faut des éléments supplémentaires pour effectuer la recombinaison des actions entreprises dans les différents plans de projection.

B) Gain apporté par l'adoption des chaînes "maître" et "esclave"

$$G\ 34 = \frac{56{,}5\ .\ 10^{4}}{9\ 548} \simeq 60$$

C) Gain apporté par l'introduction des segments pondérables :

$$G\ 45 = \frac{9548}{392} \simeq 25$$

D) Gain global réalisé avec la structure adoptée :

$$G\ g\ell = \frac{10^{37}}{2\ 000}$$

$$G\ g\ell \simeq 5\ .\ 10^{33}$$

## 4.713 - La logique d'exploitation du C.A.S.

### 4.7131 - Généralités

Son rôle principal est d'interpréter les valeurs des chaînes MX, MY, EX, EY après un parcours C.A.S. afin de connaître d'une part les paramètres Nβ Y1, Nβ X1, Nβ XO, Nβ YO et d'autre part les interdictions de couples d'actions à transmettre au C.V.C., compte tenu des situations du point M dans le C.A.S. par rapport à la position et à la forme de l'obstacle (voir les huit équations du § 4.71134).

Cette logique possède quatre fonctions principales :

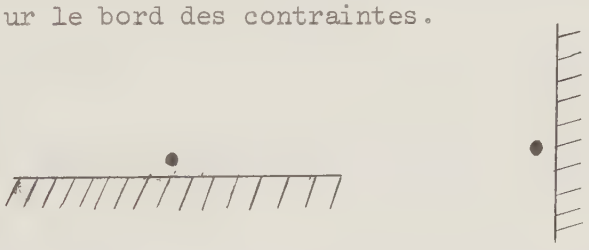
- enregistrement des données,
- prétraitement des données,
- calcul des actions et interdictions,
- mise en forme des résultats.

### 4.7132 - Enregistrement

Les informations qui ne sont pas présentes au moment de l'utilisation sont enregistrées d'une manière définitive au moment où elles apparaissent. On utilise à cet effet des boitiers CFF[1] qui sont remis à zéro par les entrées directes après chaque exploitation.

Certaines données existent dès la fin du chargement et ont une signification seulement à ce moment bien qu'elles puissent apparaître au cours du fonctionnement. C'est le cas des ACX et des ACY.

Le signal qui apparaît sur le connecteur 27 des C.A.S. n'a de signification que s'il se rapporte au point de départ β. Il signifie que SD est sur le bord des contraintes.



Cette situation peut apparaître au cours de l'exploration du C.A.S., mais elle n'a plus aucune importance. Il faut donc en autoriser l'enregistrement avant l'exploration du C.A.S. Cette autorisation est faite sur le connecteur 14 de B 25 (voir fig. 4713a).

### 4.7133 - Prétraitement des données

#### 4.71331 - Elimination des données fausses

a) Par définition, nous avons EX ≥ MX et EY ≥ MY. Si le cas contraire apparaissait, il y aurait mauvais fonctionnement et il faudrait interrompre le calcul. Cette situation correspondrait au cas où un "esclave" serait arrivé avant son "maître". La fonction logique correspondante est $(EX \cap \overline{MX}) \cup (EY \cap \overline{MY})$. Ceci ne pouvant être validé que pendant un temps, il en résulte un enregistrement obligatoire sur un CFF.

(1) Clocked flip-flop

C'est le cas par exemple dans lequel une situation de départ ou d'arrivée se trouve sur une zone de contrainte. Pour détecter cette anomalie, un ordre d'arrêt de la machine est envoyé par le connecteur 30, ordre qui entraîne le clignotement du voyant ROUTAGE.

b) Lorsque le départ β se fait sur le côté d'une contrainte, un des deux chemins n'existe pas mais néanmoins les chaînes X ou Y peuvent décompter. Il faut interdire aux résultats correspondants d'être utilisés. Un signal d'autorisation est envoyé sur les portes ET se trouvant sur le trajet des variables EY, MY, EX, MX :

ACY inhibe MX et EY

ACX inhibe MY et EX

c) De la même manière, on inhibe un des deux chemins lorsque le point d'arrivée se trouve sous une contrainte. Ce cas est représenté par les fonctions HX et HY :

HX inhibe MX et EY

HY inhibe MY et EX

4.71332 - Détermination de la position de la situation de SD (point d'arrivée en progression β) par rapport aux contraintes

Il s'agit de détecter électroniquement la présence des situations ALX, CS, ECX, ALY, CY, ECY, signalées au § 4.7113.

Détection de ALX, CX, ECX :

considérons ALX, CX et ECX. Dans ces trois cas, le point d'arrivée β se trouve à l'aplomb de la contrainte (fig. 4713c). Cette situation se détecte par la succession des événements suivants :

à t = 0 : CCX = 0

à t = 0 + 1 : CCX ≠ 0 MY = 0

à t = 0 + 2 : MY ≠ 0

soit $G(X) = MY \cap D(\overline{MY} \cap CCX) \cap D^2 \overline{CCX}$ (1)

(voir la représentation de cette fonction au § 4.713d)

$$\boxed{G(X) = MY \cap D\left[\overline{MY} \cap CCX \cap D\,\overline{CCX}\right]}$$

Le circuit logique correspondant est donné par les figures 4713e et 4713f. On a évidemment un schéma équivalent pour G (Y).

Ayant G (Y), il faut ensuite déterminer en présence de quels cas (ECX, CS, ALX) on se trouve :

• ECX :

(1) D : opérateur qui retarde d'un temps la variable sur laquelle il s'applique, dans un système séquentiel.

L'arrivée en ECX est détectée par le C.A.S. dès le chargement et enregistrée sur la plaque d'exploitation en ECX 1 (connecteur 12). En effet, dans ce cas EX = D (MY).

• ALX - CX :

Pour départager ALX de CX, il faut utiliser la progression de l'autre chemin. Si au moment où le maître correspondant à l'autre chemin arrive, les contraintes ne sont pas annumées. On se trouve sur CX ou sinon sur ALX (fig.4713g).

Appelons H (X) la fonction qui départage ALX de CX. Nous avons

$$HX = D\ \overline{CCY} \cap D\ \overline{MX} \cap MX$$

La suite des événements est donnée par la fig. 4713h. On remarque que H (X) n'apparaît que sous forme d'un seul créneau, donc il faut l'enregistrer sur CFF. Cela conduit au circuit électronique de la fig. 4713j.

En résumé :

$ECX = GX \cap ECX1$ $\qquad$ $ECY = GY \cap ECY1$

$CX = GX \cap HX$ $\qquad$ $GY = GY \cap HY$

$ALX = GX \cap HX$ $\qquad$ $ALY = GY \cap HY$

Tant que MX n'est pas arrivé, on a $\overline{HX}$. On peut avoir aussi GX donc ALX. Mais cela ne donne pas de résultats faux car ALX ne sera utilisé dans les calculs ultérieurs que si MX est arrivé. Quand MX arrive sur ces portes, l'information $\overline{HX}$ si elle existe, signifie effectivement que l'on est sur l'alignement.

Une précaution supplémentaire a été ajoutée lorsque le point de départ β se trouve sur le côté de la contrainte; ce qui est repéré sur les entrées 8 et 9. Si on se trouve sur ALX, les actions dues au chemin supérieur ne sont jamais autorisées dans les C.V.A. puisqu'on interdit aux compteurs correspondants d'avoir un effet.

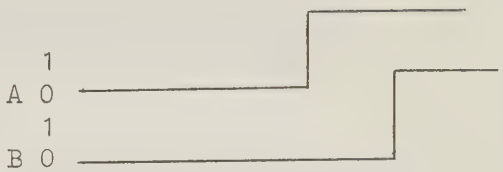
Il est cependant aisé d'interdire ces actions (ici : X = 0, Y = 1, et X = 1, Y = 1) dans le C.V.C. correspondant. Il suffit d'ajouter les fonctions :

$CX = ALX \cap ACY$ et $CY = ALY \cap ACX$
(connecteurs 25 et 26)

4.7134 - Calcul des actions et des interdictions

Les fonctions donnant les actions et les interdictions ont fait l'objet des huit équations de base du C.A.S. (47113.41 à 47113.48). Il s'agit maintenant de traduire ces fonctions sous forme de circuits électroniques.

Le problème principal est de composer l'ordre d'arrivée de deux variables :




$(A < B) = B \cap D\ (\bar{B} \cap A) = B \cap \bar{D}B \cap DA$

$(A = B) = (A \cap B)\ D\ (\bar{A} \cap \bar{B}) = A \cap B \cap \bar{D}A \cap \bar{D}B$

$(A > B) = A \cap D\ (\bar{A} \cap B) = A \cap \bar{D}A \cap DB$

Le circuit logique correspondant est représenté sur la fig. 4713k. Les fonctions n'apparaissent que sous forme d'une impulsion, il faudra les enregistrer dans un CFF.

D'ailleurs, on peut introduire G (X) et G (Y) dans les équations de base du C.A.S. qui peuvent s'intituler : le système d'équations simplifiées du C.A.S.

A) Relation 47113.41 bis :

$$(X = 1) = \left\{\left[(EX \cap MY) \cup (EY \cap MX)\right] \cap (\bar{GX} \cup ECX)\right\} \cup \left[ALY \cap (EX \cap MY)\right]$$

B) Relation 47113.42 bis :

$$(Y = 1) = \left[(EY \cap MX \cap \bar{GY} \cap ECY)\right] \cup \left[(EX \cap MY \cap \bar{GY} \cup ECY)\right] \cup \left[ALX \cap EY \cap MX\right]$$

C) Relation 47113.43 bis :

$$(X = 0) = D\ (X = 1) \cup (EY > MX) \cup (EX < MY)$$

D) Relation 47113.44 bis :

$$(Y = 0) = D\ (Y = 1) \cup (EX > MY) \cup (EY < MX)$$

E) Relation 47113.47 bis :

$$(\text{int } 01) = CX$$

En effet, lorsque ECX est validé, CX l'est aussi ; de même pour la suivante.

F) Relation 47113.46 bis :

$$(\text{int } 10 = CY)$$

G) Relation 47113.45 :

$$(\text{int } 00) = (EY > MX) \cap (EX > MY) \cap (EX = EY)$$

H) Relation 47113.48 :

$$(\text{int } 11) = (CY \cap \bar{ECY}) \cup (CX \cap \bar{ECX}) \cup (ALX \cap ALY)$$

## 4.7135 - Mise en forme des résultats

### 4.71351 - Actions

Selon le choix des trains sur le C.A.S. considéré, un train qui est représenté par la variable X peut être sélectionné "horizontal" ou "vertical". Il faut donc être capable d'aiguiller les ordres X vers H ou V et les ordres Y vers H ou V. Cet ordre de concordance est reçu en 18 et sert à réaliser tous les aiguillages nécessaires (voir fig. 4713a).

Le temps maximal nécessaire pour obtenir un résultat est égal à la somme du temps maximal de parcours du C.A.S. (soit 2 x 14 x 31) et du temps de décomptage des compteurs d'éloignement fictif de but, (soit $2^{11} - 1$).

Il faut y ajouter un temps de retard pour le déclenchement de l'horloge C.A.S. Cela fait 1 892 pas. Pour simplifier le décodage, on fait la détection à partir du 1 919è pas. On doit alors obtenir :

$$(H = 0) \cap (V = 0) \cap [(H = 1) \cap (V = 1)]$$

si le fonctionnement est normal. Un mauvais fonctionnement est détecté sur la sortie 43.

### 4.71352 - Interdictions

Les interdictions doivent être chargées sur les C.V.C. diagonal de façon séquentielle. On le réalise après aiguillage de 01 et 10 dans un registre, par les entrées directes. Ce chargement n'est possible que si l'autorisation a été commandée par les entrées directes. Ce chargement n'est possible que si l'autorisation a été commandée par l'impulsion 1919.

Les résultats sortent en quatre temps, commandés par un compteur quatre bits et à ce moment-là, l'autorisation de chargement est évidemment supprimée. Cette commande se fait par le connecteur 39.

### 4.71353 - Fonctions annexes

A) La commande de concordance est utilisée pour aiguiller l'horloge en V ou en H. Les entrées sont en 19 et 20. Les déclenchements de progression de trains H et V que l'on aiguille après enregistrement permettent de valider une horloge H 1 en 31 et 32 ou en 33 et 34.

B) Pour la sortie 42, on s'assure que la remise à zéro des bascules (RAZ) s'est effectuée correctement dans le C.A.S.

C) Pour le centre de sélection, il est nécessaire d'indiquer les couples des actions premières hiérarchiquement, qui sont interdites. Cette situation doit être enregistrée après la progression dans le C.A.S. en utilisant l'autorisation de quatre temps qui apparaît après le 1 919è temps, envoyé par 44.

Ce signal a pour équation :

$$(44) = [(\text{int } 11 \cap \text{act 1 prio}) \cup (\text{int } 00 \cap \overline{\text{act 1 prio}})] \cap \overline{\text{int } 01} \cap \overline{\text{int } 10}$$

4.71354 - Fonctions de commande

L'impulsion 1 919 est utilisée pour déclencher l'horloge de décodage du registre des interdictions, par le connecteur 40. Une série de quatre impulsions est envoyée sur les C.V.C. diagonaux au 1 920è temps où l'on enregistre à nouveau les interdictions. Ce temps de retard permet le chargement du registre par les entrées directes.

La succession des ordres par les entrées de commande est représentée par la fig. 4713ℓ. Il y a lieu de noter que la commande de RAZ se fait pendant tout le temps où la plaque $B_{25}$ n'est pas utilisée.

## 4.72 - *Le Centre de Validation d'actions (C.V.A.)*

### 4.721 - Etude théorique du C.V.A.

#### 4.7211 - Généralités

Nous avons vu au paragraphe 4.543 que le rôle du C.V.A. était de mémoriser les résultats des parcours C.A.S., de gérer ces résultats afin que le front d'onde β soit bien arrivé à son but dans tous les C.A.S. et de déterminer le NB correspondant au nombre de pas β minimum global à faire, pour qu'une action au moins soit possible sur chaque variable, compte tenu de la cohérence.

#### 4.7212 - Définition des caractéristiques

Etant donné que pour une variable il faut enregistrer de manière indépendante le NB pour l'action 0 et pour l'action 1 nous devons donc envisager de concevoir une unité C.V.A. par action. Il y aura par suite deux unités C.V.A. par variable.

Puisque la première fonction du C.V.A. est une mémorisation, nous utiliserons un compteur binaire capable d'emmagasiner le nombre n maximum à mémoriser.

Evaluation de n :

soit n' : les dimensions en pas du C.A.S.

n' = 2 (14 x 31) = 868

n" : l'éloignement maximal de but fictif

n" : 960 (voir paragraphe 4.74)

n = n' + n" = 1 828

En réalité, il faut un temps de transfert entre le C.A.S. et le C.V.A. et quatre temps supplémentaires de traitement dans la plaque logique d'exploitation. En outre l'éloignement fictif de but de 960 est compté avec un compteur à 10 bits ($2^{10} - 1 = 1\ 023$), la capacité maximale du compteur C.V.A. sera : n = 1 023 + 868 + 4 + 1 = 1 896 bits.

Ce nombre nécessitera un compteur de 11 bits car :

$2^{10} < 1\,896 < 2^{11} = 2\,048$

4.722 - Réalisation physique (voir fig. 4722a)

4.7221 - Présentation

Nous avons réalisé un "module C.V.A." par variable, ce qui correspond à une plaque logique. L'ensemble C.V.A. est constitué de huit plaques (repérées de C 25 à C 32) et comprendra quatorze plaques (repérées de C 16 à C 21 et de C 25 à C 32) lorsque la machine fonctionnera avec quatorze variables.

Chaque module est composé de deux décompteurs appelés respectivement "décompteur d'action 0" et "décompteur d'action 1" ainsi que de la logique de commande et d'exploitation.

Pour des raisons de simplification technologique, il a été intéressant de transformer le fonctionnement du compteur onze bits précédemment défini en un décompteur. Au lieu de compter le nombre de temps utile, on décompte le décompteur de son complément à 2 048.

4.7222 - Fonctionnement (voir fig. 4722a)

Il y a lieu de distinguer deux phases importantes :

- l'exploration $\beta$,
- l'élaboration du pas $\gamma$.

A) Exploration $\beta$ :

Au cours du parcours C.A.S. (entrée 19 venant de B 22) la variable (le train) est affectée à l'un des deux axes :

- axe H (pour horizontal) : le train est alors sélectionné H (entrée 24) ;
- axe V (pour vertical) : le train est sélectionné V (entrée 22).

Quatre signaux positifs indépendants et permanents dès l'instant où ils sont apparus, sont générés par la plaque exploitation C.A.S. au cours du parcours C.A.S.

Ces signaux apparaissent en H 1 (entrée 25), H 0 (entrée 16), V 1 (entrée 27) et V 0 (entrée 15).

Les deux premiers seront seuls utiles pour le module s'il est sélectionné H, les deux derniers étant utiles si le module est sélectionné V.

Ces signaux (S) (voir fig. 4722b1) apparaissent au moment où le front d'onde $\beta$ partant du but arrive sur la "position actuelle" SD. Le nombre de temps d'horloge écoulés entre le départ de SA et l'arrivée en SD indique le nombre de pas minimum qui serait nécessaire pour atteindre le but en faisant faire l'action correspondante à la variable. Cela correspond aux paramètres NBj 1 et NBj 0.

Quand une variable est impliquée une nouvelle fois dans un parcours C.A.S., la valeur précédemment mémorisée ($N^{J}_{Bi1}$) dans le décompteur ne doit être remplacée par la nouvelle valeur ($N^{k}_{Bi1}$) que si cette dernière est supérieure à la première.

C'est à dire si $N^{k}_{Bi\ 1} > N^{i}_{Bi\ 1}$. Un raisonnement analogue est valable pour l'action 0. Cette fonction est réalisée par suppression du décomptage du décompteur qui s'opère de la façon suivante :

- supposons que le décompteur ait enregistré n 1 pour l'action 1 de la variable i prise avec la variable j ;
- supposons que l'on doive enregistrer n 2 (voir fig. 4722b1) pour l'action 1 de la variable i prise avec la variable k.

Dès le début du parcours C.A.S. (ik), le décompteur va décompter. Après n 1 temps d'horloge il sera à 0 (fig. 4722b2).

SI n 2 > n 1, le décompteur sera bloqué pendant n 2 - n 1 temps (fig. 4722b3).

Au n 2ième temps, un signal S de validation va apparaître et autoriser la reprise des décomptages jusqu'à la fin de la séquence parcours C.A.S., c'est-à-dire jusqu'au 2 048è temps. A la fin du 2 048è temps, le C.V.A. contiendra la valeur n 2 puisqu'on l'aura décompté pendant 2 048 - n 2 temps à partir de 2 048 :
2 048 - (2 048 - n 2) = n 2.

Si n 2 < n 1, le décompteur ne marque pas de temps d'arrêt à zéro et, faisant un tour complet il est donc ramené à sa valeur initiale n 1.

Suivant ce processus, à la fin du temps β, chaque décompteur d'action de chaque variable sera ainsi mémorisé à la valeur maximale trouvée.

*Nota :*

Si au cours d'un parcours C.A.S. une valeur n 2 a été trouvée égale strictement à n 1, pour le compteur d'action 0 de l'une des variables, une commande de "RAZ ambiguïté" (sortie 21) sera faite vers le C.V.C., c'est-à-dire que pour les éléments de C.V.C. liés à cette variable sera faite une remise à zéro de l'inhibition d'action 00. Cela correspond aux"cas" n° 10 et 21 (paragraphe 4.71132).

B) Elaboration du pas γ :

Au cours du temps γ, l'ensemble des décompteurs des C.V.A. est décompté par la plaque "timing γ" par l'entrée 18 jusqu'à ce qu'il y ait au moins une action possible (0 ou 1) par variable. Cette possibilité est traduite par le fait qu'un au moins des décompteurs de chaque variable est arrivé à zéro. Ce fait est détecté par la sortie 39 commune avec tous les modules C.V.A.

Ensuite un essai de cohérence est fait au niveau C.V.C., c'est-à-dire que chaque C.V.A. va donner au C.V.C. les interrogations d'actions correspondantes à celles qui lui sont permises. Cette autorisation est pilotée par la "commande d'amorçage" (entrée 10 commune à tous les C.V.A.). Les mémoires D 1 et B 1 ont été remises préalablement à 1 par le décomptage γ. Le résultat de ces interrogations sera présenté aux entrées 12 (autorisation action 0) ou 42 (autorisation action 1) selon l'état du C.V.C. et le nombre des interrogations (voir fig. 4722c).

Si une des variables n'avait plus aucune action possible après l'essai de cohérence, cette situation serait signalée par la sortie 41 et un nouveau décomptage γ pour passer à NB + 1 interviendrait en faisant apparaître de nouvelles autorisations d'actions c'est-à-dire enrichir le système d'actions initial présenté au C.V.C.

Il est à noter que si un décomptage γ reprenait alors que l'action 0 était validée pour une variable, cela entraînerait la RAZ des interdictions de couple d'actions 00 pour les couples formés par la variable concernée, avec les autres variables. Cette remise à zéro se fait grâce à la sortie 21 par l'intermédiaire du circuit flip - flop C1.

Si par contre il n'y a pas eu d'échec, une commande d'enregistrement est faite par la plaque timing γ, mémorisant respectivement en B1 et D1 les autorisations d'actions ayant satisfait à la cohérence intervariables.

Une interrogation successive des différents C.V.A., dans l'ordre de la hiérarchie (entrée 4) permettra alors de détecter (par la sortie 6) celles des variables qui ont deux actions permises, pour lesquelles par conséquent il y a un choix à faire. Le timing γ va alors successivement essayer de supprimer l'action 1 (entrée 44) ou l'action 0 (entrée 13) de manière à voir si ces deux actions amènent à une solution cohérente pour l'ensemble des variables.

Si les deux solutions (action 0 et action 1) sont cohérentes, la variable est mémorisée dans le système de hiérarchie.

Si aucune des deux solutions n'est cohérente, un décomptage γ est repris (on passe à NB + 1).

Si l'une seulement des deux actions est valable elle est conservée et mémorisée dans les "flip - flop" B 1 et D 1.

Naturellement dans le cas où les deux actions sont permises seule est conservée l'action qui donne une cohérence après suppression de l'autre, (les suppressions d'action se faisant dans l'ordre inverse de la hiérarchie interactions affichée pour cette variable).

Signalons que la sortie 7 commune avec les autres modules C.V.A. est utilisée au moment de la RAZ pour vérifier que tous les compteurs ont été effectivement remis à zéro. L'entrée 5 est une commande spéciale qui permet d'assurer la RAZ des boucles C.V.A. - C.V.C.

## 4.73 - Le Centre de Vérification de cohérence (C.V.C.)

### 4.731 - Etude théorique du C.V.C.

#### 4.7311 - But

Nous avons vu au paragraphe 4.544 que le C.V.C. devait permettre la compatibilité des différents pas γ qu'il est possible d'entreprendre dans chaque C.A.S. Pour cela il doit mémoriser certaines interdictions :

- interdictions de situations qui suppriment la possibilité de trouver simultanément deux trains sur le même canton ou à un certain nombre de cantons de distance ;
- interdictions de recombinaison qui prennent en compte le fait que deux trains autorisés à stationner par le C.V.A. ne peuvent en fait le faire simultanément, si CHS = CHI = Nβ.

Le C.V.C. intervient donc lors de la détermination du pas γ. Lorsque le C.V.A. et les systèmes de hiérarchie déterminent une solution, on interroge le C.V.C. pour savoir si cette action ne comporte pas, parmi tous les couples d'actions élémentaires dont elle est composée, un ou plusieurs couples engendrant des situations interdites par les mémorisations.

#### 4.7312 - Définition des éléments

A) Au paragraphe 4.5445 nous avons établi les équations généralisées d'un C.V.C. pour un espace n dimensionnel, qui montrent que les actions de chaque variable doivent être confrontées aux actions de toutes les autres variables suivant une structure définie par la fig. 4544g.

Pour une machine à quatorze variables cela donne 28 actions à comparer deux à deux soit :

$$C_2^{28} = \frac{28 \times 27}{2} = 378 \text{ points de comparaison}$$

En réalité il faut retrancher quatorze points qui correspondent aux comparaisons des deux actions d'une même variable ce qui fait 364 points.

Etant donné qu'une variable peut faire l'action 0 ou 1, il est indispensable de regrouper les points de comparaison quatre par quatre afin d'obtenir une comparaison de variable à variable de façon à retrouver la structure du module élémentaire de la fig. 4.544d. Cela donne $\frac{364}{4}$ soit 91 modules élémentaires (28 dans le cas de huit variables).

B) Fonction d'un module élémentaire C.V.C.

D'après la fig. 4544e nous voyons qu'un module élémentaire doit :

- recevoir les actions validées par les C.V.A. à Nβ ;
- recevoir les interdictions d'actions de la part du C.A.S. (par B 25) ce qui correspond aux interdictions de situation ;

- recevoir les interdictions de recombinaison de la part des C.V.A. ;
- réclamer le système S'i d'actions autorisées par le C.V.A.

C) Schéma fonctionnel (voir fig. 473a)

En considérant la fig. 4544e, il est souhaitable de mémoriser les quatre types d'interdiction en provenance du C.A.S., car le C.V.C. devra comparer tous les résultats après un traitement complet de tous les couples de variables sur le même C.A.S. physique qui est incapable de conserver lui-même les solutions de tous les traitements successifs. Les quatre interdictions seront alors mémorisées dans les bascules B1, B2, B3, B4 de la fig. 473a. Pour chaque parcours C.A.S., le contenu du compteur de mémorisation des interdictions de la plaque B 25 sera transféré intégralement dans les mémoires B1, B2, B3, B4.

D'autre part l'interdiction de recombinaison 00, du C.V.A. devra si elle existe, rendre active la bascule B3 correspondant à la mémorisation d'interdiction 00.

4.732 - Réalisation physique du C.V.C. (voir fig. 473c)

4.7321 - Description

Le Centre de vérification de cohérence est formé de plaques regroupant quatre modules élémentaires C.V.C. Il en résulte que certains éléments diagonaux ne peuvent être regroupés, ce qui donne deux types de plaques :

- le module C.V.C. qui est formé de quatre modules élémentaires ;
- le module C.V.C. diagonal qui est formé d'un seul module élémentaire.

A huit variables, le C.V.C. sera formé de six plaques "module C.V.C." repérées D 23, D 24, D 25, D 27, D 28 et D 30, et de quatre plaques "module C.V.C. diagonal" repérées D 26, D 29, D 31 et D 32.

A quatorze variables il faudrait 22 plaques "modules C.V.C." repérées D 5 à D 15, D 17 à D 21, D 23 à D 25, D 27, D 28 et D 30, et six plaques "module C.V.C. diagonal" repérées D 16, D 22, D 26, D 29, D 31 et D 32 (voir fig. 411a2).

4.7322 - Dialogue C.V.A. - C.V.C.

Le C.V.A. dialogue avec un module élémentaire C.V.C. par quatre fils : deux servent à l'interrogation (un pour l'action 1, l'autre pour l'action 0), les deux autres servent au retour des signaux d'autorisation d'action vers le C.V.A.

Le C.V.A. peut aussi annuler les interdictions de recombinaison sur les modules élémentaires correspondant à un train. Signalons qu'il est inutile que cette annulation, pour le module correspondant au couple de trains (a, b) provienne à la fois des deux fils de RAZ du train a et du train b (voir fig. 473b).

A chaque parcours d'un C.A.S. (par exemple celui du couple de train a, b) la logique d'exploitation permet de déterminer les interdictions pour le prochain pas $\gamma$. Celles-ci sont enregistrées sur le module élémentaire correspondant, par l'intermédiaire d'une autorisation d'enregistrement fournie par les fils "sélection H ou V" (voir fig. 473a) et de deux fils "mémorisation interdictions" et "horloge C.V.C." issus respectivement de la logique d'exploitation C.A.S. et du timing.

4.7323 - Fonctionnement d'un module C.V.C. (voir fig. 473a)

Supposons que le C.V.A. permette l'action 0 pour X. Le signal autorisation X0 apparaîtra que si une des action (0, 0) ou (0, 1) est permise et si d'autre part Y1 ou Y0 est validé. Supposons que Y1 soit soit validé. Il faut qu'il n'y ait pas d'interdiction de recombinaison Y = 1, X = 0. Le bistable B 1 ne doit donc pas mémoriser d'interdiction.

4.7324 - Le module C.V.C. diagonal (fig. 473e)

Il ne contient qu'un seul module élémentaire, mais réalise deux autres fonctions :

- Interconnexions

Ce sont des liaisons entre toutes les plaques situées sur une même ligne appelées liaisons de type H (fig. 473b) et toutes les plaques situées sur une même colonne, appelées liaison de type V.

Les interrogations et autorisations relatives à un train sont pour certains modules C.V.C. de type H, et pour d'autres de type V. Avec la disposition des plaques choisie, l'interconnexion des plaques aurait nécessité des liaisons au niveau des plaques diagonales C.V.C. entre les entrées et sorties de type H et de type V. Il a paru intéressant d'intégrer ces liaisons aux plaques.

Sur la fig. 473e on peut constater qu'il y a une liaison entre les deux entrées correspondant à une INT Y 0 1 (type H) et une INT X 0 1 (type V).

- Amplification

Les liaisons entre racks devant être parcourues par un courant faible, les commandes sont amplifiées dans le C.V.C. ; les amplifications de sélection H ou V ont été réparties entre les différents "modules C.V.C. diagonaux". Les amplifications "mémorisation interdictions" et "horloge C.V.C." sont sur un "module C.V.C. diagonal" légèrement différent car il possède une programmation et appelé de ce fait "module C.V.C. diagonal programmé".

*Remarque :*

Le chargement des registres du C.V.C. se fait dans l'ordre indiqué par la fig. 473f. Il correspond au cycle d'exploration C.A.S. Les variables en tête de la suite alphabétique sont traitées en premier.

## 4.74 - Le centre "module trains"

### 4.741 - Etude théorique du module situation trains

#### 4.7411 - Généralités

Le but de ce centre est de mémoriser d'une part la position de la variable pour chaque traitement (B + $\gamma$) et d'autre part l'éloignement de son but fictif.

Ce centre de mémorisation permet de considérer automatiquement l'extrémité d'un vecteur $\vec{\gamma}$ comme nouvelle situation de départ SD permettant d'élaborer le vecteur $\vec{\gamma}$ suivant. Ce centre permet donc le déplacement automatique de SD pas à pas (sur la trajectoire optimale) jusqu'à ce que le dernier SD soit confondu avec SA (ce cas correspond à un problème complètement résolu). Grâce à ce centre de mémorisation il est possible d'appliquer le théorème de BELLMAN et de prendre en compte l'hypothèse d'adaptation H 4.

L'éloignement fictif de but peut être :

- soit fixé à l'avance dans le cas d'affichage de variable prioritaire ;
- soit indexé aux pas $\gamma$. C'est-à-dire que plus le nombre de pas $\gamma$ augmente, plus le but de la variable s'éloigne fictivement. Ce mode de fonctionnement doit être réalisé en "dynamique" (voir paragraphe 4.5425).

#### 4.7412 - Définition des paramètres du centre module trains

Au fur et à mesure de l'élaboration de la trajectoire $\gamma$, la position de chaque variable est susceptible de varier à chaque pas $\gamma$. Comme l'éloignement fictif de but est lui aussi attaché à une variable particulière, il a paru nécessaire de réaliser des centres de mémorisation fonctionnels indépendants pour chaque variable.

La position initiale du train pouvant se situer sur l'un des quatorze cantons d'un itinéraire, il est nécessaire de disposer d'un registre à décalage de quatorze bits, chaque bit correspondant à l'un des cantons possibles d'un itinéraire.

Connaissant la position du train (par le numéro de canton)sur l'itinéraire, il est nécessaire de localiser finement le train sur ce canton étant donné qu'il peut y occuper 31 positions différentes. Un compteur de cinq bits précise donc la position fine du train sur le canton, par le nombre de pas $\gamma$ élémentaires que doit faire le train avant de passer au canton suivant. Un pas élémentaire est d'ailleurs représentatif d'un temps de présence minimal.

En ce qui concerne l'éloignement fictif de but, il faut concevoir un compteur capable de coder en binaire l'éloignement en pas dû à la priorité maximum soit 960 pas. Un compteur de dix bits ($2^{10}$ = 1 024) s'avère nécessaire.

Il faut remarquer que 1 024 représentera le nombre maximum susceptible d'être inscrit dans le cas d'un fonctionnement dynamique. On peut penser en effet qu'une variable classée hautement prioritaire (avec 960) n'aura pas tendance à stationner et que par conséquent en fonctionnement "dynamique" l'éloignement automatique de but avec le nombre de pas $\gamma$ serait sans effet sur l'ordonnancement (cette variable classée hautement prioritaire ne pourra en effet acquérir que 1 024 - 960 = 64 pas d'éloignement fictif de but supplémentaire par le fonctionnement dynamique).

De même pour une variable non prioritaire, on estime qu'en général son stationnement en "dynamique" sera inférieur à son temps global de parcours. Selon cette hypothèse la valeur maximale qui pourrait s'inscrire dans le compteur d'éloignement serait de 2 x 434 soit 868 : valeur qui peut elle aussi se coder en binaire par le compteur de 10 bits.

## 4.742 - Réalisation pratique du "module situation train"

### 4.7421 - Présentation (voir fig. 4742a)

Il a été réalisé un module situation train par plaque logique. L'ensemble "Situation trains" comprend huit plaques repérées B 7 à B 14 et sera formé de quatorze plaques repérées B 1 à B 14 lorsque la machine fonctionnera à quatorze variables.

La partie où est consignée la position du train comporte :

a) le registre quatorze bits de position sur l'itinéraire,

b) le compteur cinq bits de position fine sur le canton,

c) les "logiques" d'entrée et de sortie.

La partie où est consignée l'éloignement fictif de but comporte :

a) le compteur dix bits d'éloignement fictif,

b) la commande d'affichage des niveaux de priorités,

c) les "logiques" d'entrée et de sortie.

### 4.7422 - Fonctionnement

#### 4.74221 - Chargement des données

L'inscription initiale de l'éloignement fictif de but se fait :

- par commande manuelle des trains choisis à cet effet ("trains mis prioritaires") ;
- par action d'interrupteurs Cirdjet permettant d'afficher les niveaux de priorité en commandant un ou plusieurs des bits 7, 8, 9 et 6 ou 10 indépendamment sur chaque plaque (voir fig. 4742b).

Ces commandes déclenchent une séquence de deux temps :

- le premier temps positionne à 1 les cinq derniers bits du compteur ;
- le deuxième remet à zéro certains de ces bits, selon la programmation de la plaque. Pour une programmation de faible éloignement de but fictif, les straps 1 et 1' sont mis (ce qui correspond à l'éloignement maximum de 480), les straps 2 et 2' étant inutilisés. Le 10è bit est remis à zéro systématiquement et l'action (passage de la position 3 à la position 1) des cirdjets remet à zéro sélectivement les bits 6 à 9.

De même pour une programmation de fort éloignement de but fictif les straps 2 et 2' sont mis, les straps 1 et 1' étant inutilisés : le 6ème bit est systématiquement remis à zéro et l'action des cirdjets remet sélectivement à zéro les bits 7 à 10.

L'action du 2ème temps sera confirmée par les voyants "priorité" situés sur le panneau de commande et qui correspondent chacun à un train choisi.

L'inscription initiale des trains (voir fig. 4742c et 4742d) se fait :

- par commande manuelle des trains choisis à cet effet ;
- par la programmation des matrices d'affichage "canton initial" et "position sur le canton initial" ;
- par commande manuelle de mise sur réseau. La mise sur réseau est confirmée par les voyants "mise sur réseau", situés sur le panneau de commande et qui correspondent aux trains choisis. Cette inscription nécessite un balayage des matrices d'affichage, qui est réalisé par le "registre de balayage". Ce registre balaie la matrice "canton initial" du dernier au premier canton. Le passage sur canton actuel positionne à 1 le bistable d'inscription du registre de position actuelle, et le premier bit de ce registre à la fin du balayage, remet ce bistable à zéro. Ainsi pendant le positionnement à 1 du bistable, le bit représentatif de la position actuelle aura pu se décaler sur le registre du nombre de pas indiqué sur la matrice.

Le balayage de la matrice "position sur "canton initial" est fait de la première à la dernière position, de sorte que le compteur de position sur canton qui est utilisé en décompteur peut être décompté des bits inutiles après passage sur la colonne indiquant la pondération désirée.

4.74222 - Recopie d'itinéraire dans le C.A.S.

Avant chaque exploration β il faut relever dans le "Module situation train" les informations utiles au C.A.S.

- position actuelle sur l'itinéraire
- position fine sur le canton

} des deux derniers trains concernés

Les autres informations utiles au C.A.S. seront relevées par balayage des matrices :

- canton final ;
- pondération des cantons.

A ce moment, l'ensemble du système de recopie est situé sur la plaque dite de "liaisons" repérée A 17. La commande de recopie d'itinéraire inhibe sur les "modules trains" la commande de position sur "canton initial" lorsque la matrice "canton final" est balayée. Cette interdiction est nécessaire car les matrices "canton final" sont regroupées sur une seule matrice à trois plans dite "canton initial et final".

La recopie d'itinéraires dans le C.A.S. se fait successivement pour chacun des deux trains pris en compte, ces deux trains ayant été eux-mêmes choisis par le système dit de "sélection".

La commande de recopie d'itinéraires (entrée 32) permet de faire décaler le bit situé sur le registre de position actuelle sur l'itinéraire en synchronisme avec la recopie sur le C.A.S. des poids des cantons successifs.

Cette recopie des poids se fait du 14è au 1er canton, de telle manière que le bit B 1 qui apparaît au bout du registre (1er canton I chargé, fig. 4742f) entraîne la recopie de la pondération du canton initial par déclenchement du transfert du contenu du compteur "position sur le canton" vers les compteurs correspondants des chaînes Maître et Esclave du C.A.S. Simultanément, l'apparition du bit B 1 en bout de registre (fig. 4742j) entraîne une inhibition des sorties de la matrice pondération des cantons afin d'éviter que le compteur correspondant au "canton actuel" ne se charge à une valeur représentant la somme des poids affichés d'une part sur la matrice "position initiale sur le canton" et d'autre part d'un poids susceptible d'exister sur le canton correspondant de la matrice de "pondération des cantons".

De manière à ramener le "module train" à son état initial, le registre de position actuelle est rebouclé sur lui-même et le décalage du registre est assuré pendant quatorze temps d'horloge (fig. 4742h).

Il faut souligner (voir fig. 4742j), que si le compteur de position sur canton était à zéro cela signifierait que le pas $\gamma$ précédent a fait changer le train de canton. (Voir fig. 4742e). C'est donc la pondération de ce canton, prise sur la matrice de pondération des cantons, qui doit être recopiée à la fois dans le C.A.S. et dans le module train. Il ne faut donc plus envoyer de signal d'inhibition sur les sorties de la matrice de "pondération des cantons". Le compteur de position sur canton est rechargé à son maximum de 31 au moment de la RAZ $\gamma$ des C.V.A. et C.V.C. par l'action d'un seul temps d'horloge. Ce travail se fait lorsque le compteur de position sur canton est à zéro, grâce à l'entrée"du compteur d'éloignement fictif de but", par une séquence de $2^{10}$ temps qui permet de ne pas modifier le contenu du compteur de vieillissement. La recopie du poids du canton se fait alors au moment de la recopie d'itinéraire dans le C.A.S. par remise à zéro des bits qui le sont sur la matrice de pondération des cantons. Ce travail se fait par action sur les PK des JK du "compteur de position sur le canton".

Signalons l'existence d'un timing spécial sur les plaques "module train" qui évite des recopies intempestives qui seraient dues à des parasites. Le contenu du "compteur de position sur le canton" est transmis en logique négative afin de simplifier le câblage.

4.74223 - Exploration β (voir fig. 4742k)

Au cours de cette exploration, seuls les compteurs "d'éloignement fictif de but" sont utilisés dans les deux modules situation trains correspondants au C.A.S. exploré. Ils sont décomptés simultanément et leur passage à zéro est différencié sur les plaques sélection C8, C11, C14, par une sélection X ou sélection Y suivant l'axe du C.A.S. affecté au train considéré.

De manière à ramener le "compteur d'éloignement fictif de but" à son état initial, le décomptage est poursuivi jusqu'à un tour complet de compteur, c'est-à-dire pendant $2^{10}$ temps d'horloge au total (phase de décomptage comprise). Cette séquence est obtenue par une "condition" qui dure $2^{10} - 1$ temps d'horloge et la "condition β" durant toute l'exploration β, c'est-à-dire le $2^{11}$ temps nécessaires au chargement des C.V.A. Un JK suiveur des $2^{10} - 1$ temps permet de reconstituer le $2^{10}$ème.

4.74224 - Définition du pas γ

Les actions (0 ou 1) que doivent faire les trains au temps γ ont pour effet :

a) de décompter éventuellement de 1 les compteurs de position sur canton par une commande spécifique pour chaque train provenant de l'ensemble C.V.A. - C.V.C. (voir fig. 4742ℓ). Une commande inopportune peut être envoyée par le C.V.A. - C.V.C. aux trains qui ne sont pas mis sur réseau. La transmission de cette commande est conditionnée sur le "module situation train" à la mémorisation de la mise sur réseau. Si au moment de ce décomptage le décompteur était à 1, il va passer à zéro. Le train va donc changer de canton et la position du bit sur le registre représentatif de la position actuelle sur itinéraire doit être décalée de 1. Pour cela, la validation d'action γ vient autoriser le décalage du registre simultanément au passage du compteur à zéro.

b) d'ajouter 1 (voir fig. 4742m) au compteur d'éloignement du but fictif si on fonctionne en "dynamique". Cela revient à lui faire subir $2^{10} - 1$ temps d'horloge. Cette addition sera cependant interdite si le compteur est au maximum car il se trouverait à zéro après un temps d'horloge. Pour cela, s'il se trouve à zéro après les $2^{10} - 1$ temps d'horloge, il est validé un temps élémentaire de la même manière qu'au temps β il pouvait être repositionné au maximum.

4.74225 - Impression de la position des trains

Les quatorze bits du registre de "position actuelle sur itinéraire" sont transmis en parallèle au système de commande de l'imprimante pour chaque train fixé par sa sélection. La position d'impression est liée à la position actuelle du train par la "Matrice de configuration des voies".

Si au cours du choix d'un système d'actions cohérent, le train est en bout de canton et que l'action a été soumise à un choix fixé par la hiérarchie intervariables, cette circonstance est enregistrée par le "bistable de mémorisation de la hiérarchie" relatif au train considéré et situé sur la plaque F 1. Au moment de l'impression de la position du train, ce bistable commandera une impression en rouge. Ce bistable est remis à zéro à chaque exploration β du C.A.S. C'est la détection de 1 du compteur de position sur canton qui fournit l'une des deux conditions de mémorisation de ce bistable.

4.74226 - Remise à zéro (voir fig. 4742n)

La commande de RAZ de durée totale $2^{11}$ temps d'horloge fait avancer les compteurs jusqu'à la détection de zéro et inhibe le rebouclage du registre de position actuelle sur l'itinéraire.

## 4.75 - *Le Centre de Coordination*

### 4.751 - Le Centre de Sélection

#### 4.7511 - Etude de la concordance : but, fonctionnement

Pour explorer séquentiellement tous les C.A.S. relatifs à un problème donné, on classe les trains selon l'ordre lexicographique. La variable classée première selon cet ordre est associée successivement à tous les trains de classement inférieur et dans l'ordre de ce dernier. La variable classée première est dite sélectionnée V, et les autres variables sont successivement sélectionnées H.

La variable classée seconde est alors à son tour sélectionnée V alors qu'elle avait été précédemment sélectionnée H quand la variable classée première était sélectionnée V. On continue selon ce processus avec les autres variables dans l'ordre de classement.

Exemple : (voir fig. 4751a)

soit quatre variables rangées dans l'ordre lexicographique : b, c, d, e.

La séquence d'exploration des C.A.S. sera dans l'ordre : bc, bd, be, puis cd, ce puis de.

1) b sera sélectionnée V avec $\left\{ \begin{matrix} c \\ d \\ e \end{matrix} \right.$ qui seront sélectionnées H

2) c sera sélectionnée V avec $\left( \begin{matrix} d \\ e \end{matrix} \right.$ qui seront sélectionnées H

3) d sera sélectionnée V avec e qui sera sélectionnée H.

Les couples de variables précédents sont associés dans le C.A.S. qui donne les informations de sortie en direction des C.V.A. Ces informations sont relatives au train situé en X ainsi qu'au train situé en Y. Notons que pour les C.V.C., les informations de sortie du C.A.S. sont relatives aux deux trains considérés.

Pour diriger ces informations X et Y sur les C.V.A. correspondants, il faut savoir si le train sélectionné V est situé sur l'axe X ou l'axe Y du C.A.S. Le même problème se pose pour un train sélectionné H. Le fait qu'une variable soit sélectionnée V ou H ne détermine nullement un axe préférentiel dans le C.A.S.

Cela est dû au fait qu'au cours de l'inscription des contraintes dans le C.A.S., une matrice élémentaire (14 x 14) de contrainte est interrogée séquentiellement et dans l'ordre croissant des numéros de cantons, par chaque canton de l'itinéraire d'interrogation. Ce dernier se trouve être, des deux itinéraires considérés à cet instant, celui de numéro le plus faible. Par exemple si on travaille dans la matrice élémentaire III - VI, ce sont les cantons de l'itinéraire III qui seront interrogateurs.

La réponse aux interrogations est obtenue en considérant l'état binaire des quatorze sorties correspondant aux quatorze cantons de l'autre itinéraire (voir fig. 410b).

Pour des raisons de simplicité et d'économie, le transfert des contraintes dans le C.A.S. est tel qu'il impose que le train parcourant l'itinéraire de numéro le plus faible soit en Y. Par ailleurs, toujours pour des économies de matériel, la sélection des C.V.A. se fait pour chacun par sélection H ou par sélection V, c'est-à-dire selon l'ordre lexicographique des variables qui leur sont associées.

Ces conditions étant imposées, un ensemble logique détecte si l'ordre lexicographique des variables correspond à l'ordre croissant des numéros des itinéraires parcourus par ces variables (voir plaque F 5).

S'il en est ainsi, le C.V.A. de la variable sélectionnée V doit mémoriser les informations de sortie du C.A.S. relatives à l'axe Y et celui de la variable sélectionnée H, celles relatives à l'axe X. Dans le cas contraire, c'est évidemment l'inverse. Si pour les itinéraires parcourus, les deux trains sont identiques, on choisit de placer le train sélectionné V en Y comme lorsque l'ordre lexicographique des trains et l'ordre des itinéraires coïncident.

Tout train sélectionné V a ses actions mémorisées comme des actions X dans le C.V.C. Tout train sélectionné H a ses actions mémorisées comme des actions Y dans le C.V.C.

S'il y a concordance, le train sélectionné V a ses actions considérées comme actions X dans le C.V.C. alors que dans le C.A.S., ce train sélectionné V est une variable Y.

S'il n'y a pas concordance (voir fig. 4751b) le train sélectionné V a ses actions considérées comme actions X dans le C.V.C. et dans le C.A.S., ce train sélectionné V est une variable X.

Exemple : (voir fig. 4751b)

Le terme "concordance" est relatif à l'ordre lexicographique des trains par rapport à la numérotation des voies correspondant aux trains mais n'est pas relatif à la correspondance des axes C.A.S. et C.V.C.

Si le train a est affecté en II et b en I, au cours du balayage dans l'ordre a b, V 2 sur F 5 sera excité avant V I. Il en résultera une non concordance qui se traduira par un aiguillage de a (sélectionné V) sur l'axe X du C.A.S.

4.7512 - Etude du système de sélection

4.75121 - But

Le rôle de ce centre est de déterminer la suite des couples de variables a b, a c ..., afin de traiter séquentiellement ces couples sur le C.A.S.

De plus il permet de sélectionner les groupements de variables qui possèdent deux actions possibles afin de détecter la "hiérarchie intervariables" et de commander une impression en rouge sur la machine à écrire.

4.75122 - Réalisation (voir fig. 4751c et 4751d)

Un ensemble sélection train et sélection HIV est réalisé par variable. Sur sélection HIV, il faut envoyer un certain nombre de conditions (mémorisation hiérarchie, décomptage $\gamma$, fin impression MAE) ainsi que les indications d'actions doubles possibles (connecteurs 9, 10 et 11).

Les centres sélection trains enregistrent les variables mises sur réseau (connecteurs 37, 38 et 39) et selon le temps d'horloge considéré, les sorties 3, 5, 7 sont mises à zéro, état significatif de la variable considérée.

Les huit variables sont affectées aux trois plaques C 8, C 11, C 14 selon le schéma (fig. 4751d). Notons qu'à quatorze variables, il faudrait réaliser deux autres plaques supplémentaires C 2 et C 5 qui prendraient en compte trois variables chacune.

4.752 - Le centre timing

4.7521 - Généralités

Un tel centre doit assurer les fonctions suivantes :

- élaboration du système de commande (génération des horloges, prise en compte des informations en provenance du tableau de commande ;
- établissement des séquences de remise à zéro logique de l'ensemble de l'électronique ;
- génération de la suite d'opérations à effectuer au temps $\beta$ ;
- génération de la suite d'opérations à effectuer au temps $\gamma$ ;
- comptage du nombre de pas $\gamma$ ainsi que du nombre de pas correspondant à la période.

4.7522 - La logique de commande : plaque B 16 (fig. 4752a)

Un multivibrateur délivre la fréquence d'horloge de deux M Hz distribuée sur l'ensemble des plaques logiques. Cette horloge est retardée d'un ou plusieurs créneaux par un centre de distribution qui permet d'obtenir $H^{-1}$ (retard d'un créneau par rapport à H), $H^{-2}$, $H^{-3}$ et $H^{-4}$ respectivement sur les correcteurs 15, 13, 9 et 7.

Un deuxième multivibrateur donne la fréquence de clignotement du voyant "routage" (connecteur 23).

Un organe "ARRET" permet de figer le problème traité à un certain nombre de pas. Ce dispositif est attaqué en parallèle par la commande arrêt, la détection "zéro", la commande arrêt "train routé", la commande "arrêt routage limité".

Le système "ARRET" agit sur la bascule "ATTENTE" qui provoque l'allumage du voyant "attente" du panneau de commande.

Un groupe de bascules appelées "PRIORITAIRES" reçoit l'indication de commande de "PRIO" et transfère cet ordre sur les "modules trains" afin de charger le "compteur d'éloignement fictif de but".

Enfin un centre "routage" reçoit la commande manuelle et transmet cette indication aux centres correspondants afin que débute le traitement.

4.7523 - La remise à zéro : plaque B 22 (voir fig. 4752b)

Un compteur dix bits permet de déterminer la durée des séquences de remise à zéro logique de 1 024 temps. Par décomptage il faut également 1 024 temps pour remettre ce compteur à zéro, si bien qu'il s'écoule 2 048 temps d'horloge entre deux passages à zéro de ce compteur, durée correspondant à une remise à zéro globale.

D'autres éléments logiques permettent de réaliser la remise à zéro automatique ainsi que la "mise hors réseau" par RAZ du "module train" correspondant.

4.7524 - Timing β : plaque B 19 (voir fig. 4752c)

Ce centre permet de définir l'ensemble des opérations effectuées au cours des "recopies sur C.A.S." pour entreprendre l'exploration β.

Les opérations successives sont :

1) remise à 1 partant des diverses mémoires du C.A.S. ;

2) chargement des contraintes ;

3) chargement d'itinéraire X ;

4) chargement d'itinéraire Y ;

5) fin de chargement et déclenchement du parcours C.A.S.

4.7525 - Timing γ : plaque C 23 (voir fig. 4752d)

A la fin du dernier parcours C.A.S., un signal apparaît en 31 et positionne à 1 le clocked flip-flop (C.F.F.) de mémorisation du temps γ. Cette mémoire commande le décomptage des compteurs d'action 0 et 1 des C.V.A. Dès qu'au moins une action coordonnée paraît possible, c'est-à-dire lorsqu'il y a dans chaque C.V.A. au moins un compteur qui est arrivé à zéro, ce décomptage s'arrête et on entre sur le registre d'essai des chaînes. Le premier temps assure un amorçage et les quatre temps suivants sont destinés à assurer une stabilisation des chaînes. Si cet essai a abouti à une réussite, on passe à la détermination de la solution. Pour cela on enregistre l'état des chaînes dans les C.V.A. et dans les mémoires de hiérarchie, celles des variables qui ont deux actions possibles.

Suivant l'ordre fixé par la matrice d'affichage, on parcourt le registre "hiérarchie" en recherchant celles des variables qui ont deux actions permises (connecteur 6). A chaque interrogation intervient par 43 un décalage du registre hiérarchie.

Lorsque la variable interrogée a deux actions permises, le C.F.F. d'essai des variables est remis à zéro et le C.F.F. d'essai des actions est positionné à 1. Simultanément un nouvel essai des chaînes est lancé, l'action hiérarchiquement inférieure ayant été supprimée. A la fin de cet essai, la mémoire d'essai des actions est remise à zéro et le C.F.F. de réussite ou le C.F.F. d'échec est remis à zéro suivant le résultat du premier essai. Un nouvel essai des chaînes est alors relancé, l'action hiérarchiquement supérieure étant cette fois-ci supprimée. A la fin de cette expérience, la mémoire d'essai primaire est remise à zéro.

- Si le premier essai avait abouti à un échec, et le deuxième à une réussite, c'est cette solution qui sera conservée et on reprendra la phase de détermination de la solution, pour les variables ayant encore deux actions permises.

- Si les deux essais se sont soldés par des échecs, le décomptage γ est repris et une remise à zéro du registre de hiérarchie et du bistable de démarrage de ce registre est assurée par un compteur quatre bits. A la fin de ce temps, le cycle normal est repris. Si le premier essai a été réussi, il y a lieu de le reprendre après le deuxième essai. En effet, si le deuxième essai avait abouti à un échec, c'est bien sûr le résultat du premier essai qu'il faudrait mémoriser et si le deuxième avait été réussi, la hiérarchie amène à préférer le résultat du premier essai et par conséquent à reprendre cet essai.

C'est d'ailleurs dans ce seul dernier cas que l'on autorisera par le connecteur n° 11 la mémorisation pour ce pas γ des variables ayant été réellement conservées par la hiérarchie intervariables. A la fin de cet essai bien entendu, il faut reprendre la détermination de la solution, de manière à faire de semblables essais pour les variables restantes ayant encore deux actions permises.

En fin de registre de hiérarchie, la situation étant ainsi déterminée se produit la phase γ'. Ce qui a été mémorisé par enregistrement dans les C.V.A. est exploité par les modules trains. Le même temps permet d'ajouter 1 au compteur de nombre total de pas γ et de retrancher 1 aux décompteurs de pas avant impression et avant arrêt.

Les mémoires de temps γ et de démarrage registre de hiérarchie sont remises à zéro, et un signal permet de démarrer le temps RAZ γ.

La RAZ test remet à zéro le C.F.F. de mémorisation de temps γ et par suite son suiveur, le registre d'essai des chaînes et par suite le C.F.F. de détermination de la solution, le C.F.F. de démarrage de la hiérarchie, le C.F.F. d'essais des variables, le C.F.F. d'essais des actions, le C.F.F. d'essais primaires et les C.F.F. d'essais secondaires.

La RAZ test a par ailleurs, de même que la RAZ γ, pour but de remettre à zéro les mémoires β de la hiérarchie et d'assurer sur les C.V.A. le décomptage γ qui assurera une RAZ.

Il faut noter que la RAZ des mémoires β de la hiérarchie est d'ailleurs permanente si l'action 0 est prioritaire (cette RAZ ne se fait cependant effectivement que pour les variables dont les C.V.A. font une commande de RAZ inhibition action 00).

Notons également qu'un certain nombre d'amplificateurs sont placés sur la plaque C 23 (H, V, horloge, parcours C.A.S., etc...).

4.7526 - Décodeur décimal : plaques D2 et D4 (voir fig. 4752e)

Le rôle de ces plaques est d'enregistrer d'une part les affichages des roues codeuses correspondant à la période d'impression de la machine à écrire ainsi que le nombre de pas de routage limité.

D'autre part elles doivent enregistrer le nombre de pas γ réalisés afin d'arrêter le traitement au nombre de pas limités et de lancer l'impression machine à écrire (MAE) à chaque période.

Une plaque D2 dite d'affichage sert d'interface entre les roues codeuses et le décodeur.

La plaque D4 forme le décompteur décimal formé de cinq décades. Trois étant affectées au décomptage du nombre de pas γ, les deux autres enregistrent la période d'impression de la M.A.E. Lorsque le nombre de pas γ décompté est nul, cela signifie que les m pas γ affichés par "routage limité" sont réalisés. Une détection de zéro commande alors ARRET sur la plaque B 19. De même lorsque le nombre de pas décomptés correspond à n (période MAE) la détection de zéro entraîne une impression machine à écrire.

## *4.76 - Le centre de liaison*

### 4.761 - Interface C.A.S. - Matrice de pondération - Situation train (plaque A 17)

4.7611 - Généralités

Cet interface est destiné à aiguiller soit vers le C.A.S. et le module train, la pondération du canton désigné en synchronisme par le registre de balayage des cantons de C.A.S. (B 31) et le registre de balayage des cantons de la matrice de pondération F 1.

Ces registres ont été chargés au moment du chargement des données dans le C.A.S. par le timing β. Au même moment est "lancé" le registre de position actuelle du train concerné. De cette façon, au passage sur le canton actuel, la pondération chargée dans le C.A.S. correspond à celle du module train.

4.7612 - Etude théorique

Cet interface doit permettre le chargement des axes C.A.S. dans les deux situations suivantes :

- au moment de la pénétration sur un canton nouveau. A ce moment le poids du canton doit être relevé sur la matrice de pondération des cantons et transmis par l'intermédiaire du compteur de pondération aux axes C.A.S. d'une part, et au compteur de position train sur canton sur le "module train" correspondant d'autre part. Cela correspond au circuit rouge sur la fig. 4761b ;
- quand la variable progresse sur le canton. A ce moment, il n'est plus question d'interroger la matrice de pondération des cantons, puisque la variable a déjà avancé sur ce canton. Le poids du canton ne peut être donné que par le module train qui mémorise la position actuelle de la variable sur le canton (circuit noir sur la fig. 4761b).

4.7613 - Définition des éléments (voir fig. 4761a)

- Un compteur cinq bits destiné à enregistrer le poids du canton affiché sur la matrice de pondération ou le poids relevé sur le module train ;
- un dispositif d'aiguillage qui permet de transférer le poids du canton actuel soit vers le C.A.S., soit vers le module train. Cet aiguillage est réglé par les signaux suivants :
  - 30 qui vient du module train et dure toute la phase de recopie ;
  - 24 qui détecte le passage sur canton actuel ;
  - 9 et 10 venant de F 3 et F 4 et actifs au moment où le registre de F 2 interroge le canton d'arrivée du train considéré sur la matrice de canton d'arrivée ;
- deux dispositifs de complémentation qui permettent de transformer le complément d'un poids en sa vraie valeur ;
- un dispositif logique d'entrée.

Notons que les valeurs des poids arrivent sur les entrées asynchrones de "mémoires", aussi bien dans le C.A.S. que dans le module train. Un système constitué par les portes B 7 et C 1 permet d'utiliser les temps morts situés entre deux impulsions d'horloge pour assurer le transfert de ces valeurs, permettant ainsi d'assurer une meilleure immunité au bruit de ces entrées asynchrones.

## 4.762 - Interface C.A.S. - Matrice des contraintes B 28 - B 31

### 4.7621 - Etude théorique

Le but de cette plaque est de :

a) localiser la position des contraintes en cantons pour un axe. Cette information est obtenue par un balayage de la matrice des contraintes ;

b) localiser la position exacte de la contrainte la plus péjorante sur l'autre axe.

La satisfaction de la condition a) implique l'utilisation d'une mémoire à quatorze bits capable de localiser les contraintes de chaque canton sur chacun des itinéraires. Ce compteur appelé "Mémoire intermédiaire" doit être chargé au cours du balayage de la matrice des contraintes (voir fig. 410b).

La satisfaction de la condition b) nécessite un compteur capable de coder quatorze en binaire soit quatre bits. Ce compteur quatre bits devra transmettre le "poids" de la contrainte sur les chaîne contraintes du C.A.S.

### 4.7622 - Réalisation

L'interface C.A.S. - Matrice des contraintes fait l'objet d'une plaque logique repérée B 28. Elle est formée :

- d'une mémoire quatorze bits (mémoire intermédiaire) ;
- d'un compteur quatre bits (mémoire tampon) ;
- d'un élément de remise à zéro des compteurs de contraintes dans le cas où aucune contrainte n'a été détectée ;
- des "logiques" d'entrée-sortie.

### 4.7623 - Fonctionnement

Sur les entrées 3 à 16 arrive en logique négative la détection qu'il existe une contrainte entre les cantons 1 à 14 de l'axe x et le canton de l'axe y correspondant à l'état d'avancement du balayage de la matrice de contrainte. Chaque mémoire A 1, B 1, C 1... D 7 est suiveuse des informations précédentes, c'est-à-dire qu'elle mémorise les détections obtenues pour le canton qui précède n y (voir fig. 4762b). Ceci correspond à (n + 1) y puisque le balayage se fait du 14ème au 1er canton.

La batterie de portes située à la sortie de ces mémoires permet de détecter :

- la présence d'une contrainte type y,
- la présence d'une contrainte type x.

4.76231 - Présence d'une contrainte type y

Conditions : (voir fig. 4762b)

- il existe une contrainte entre p x et n y (A') ;
- il n'existe pas de contrainte entre (p - 1) x et n y (B') ;
- il n'existait pas de contrainte entre p x et (n + 1) y.

L'état actif des sorties de la "batterie de portes" (huit du boitier C.I) va permettre de fixer le poids de la contrainte pour le canton (n + 1) y. Le balayage des cantons successifs du C.A.S. y, opéré par le registre de B 31 a un retard de un canton par rapport au balayage des cantons successifs de la matrice des contraintes opéré par F 1. Le balayage de B 31 désignera par conséquent le canton (n + 1) y. Le poids affiché sera alors p, c'est-à-dire que l'esclave Y ne pourra passer du (n + 1)ème au nième canton que si le maître X a parcouru 14 - p cantons.

Le poids p est mémorisé un temps dans la mémoire-tampon de manière à commander au moment voulu la mémorisation asynchrone dans le compteur de contrainte désiré du C.A.S. A noter que cette mémorisation s'opère dans le temps mort compris entre deux temps d'horloge.

Intervention de l'élément de remise à zéro des compteurs CC :

Les compteurs de contrainte des axes C.A.S. sont remis à 1 avant le début du chargement. La mémorisation asynchrone du poids p se fait par remise à zéro sélective de certains bits du compteur. Or si p = 0, cela signifie qu'il n'y a pas de contrainte sur le canton considéré. Il faut donc faire une remise à zéro systématique de tous les bits du compteur de contrainte. Cette éventualité p = 0 est détectée par l'élément de remise à zéro D 8 qui fonctionne pendant la période de recopie des contraintes dans le C.A.S.

4.76232 - Présence d'une contrainte type x

Conditions : (voir fig. 4762c)

- il n'existe pas de contrainte entre p x et n y (A') ;
- il existait une contrainte entre p x et (n + 1) y (B') ;
- il n'existait pas de contrainte entre (p + 1) n et (n + 1) y.

Ces conditions sont détectées par les "6 des boitiers de C.I" de la batterie des portes. La commande est directement liée au canton de C.A.S. correspondant où elle lance le décomptage du compteur de contrainte qui va se poursuivre jusqu'à la fin du balayage.

4.763 - Registre de balayage des cantons C.A.S. (B 31) - (Voir fig. 4763a)

Le rôle de ce registre est de balayer successivement les cantons de chaque axe du C.A.S. afin de permettre la recopie des poids des cantons et des poids des contraintes.

Il est formé d'un registre de quatorze bits, retardé d'un canton par rapport au registre de balayage des contraintes de F 1 (élément retardateur 1 bit).

## 4.8 - REALISATION PHYSIQUE des ENTREES

### 4.81 - Les matrices d'affichage

#### 4.811 - La matrice des contraintes (voir fig. 48a)

A) Aspect théorique

Chaque élément de matrice permet de réaliser les contraintes entre deux itinéraires. Avec six itinéraires, il en résulte $C_6^2 = 15$ éléments de matrices correspondant aux quinze couples possibles d'itinéraires pris deux à deux. De plus, il faut disposer d'une matrice supplémentaire par itinéraire permettant d'afficher les contraintes de succession qui s'appliquent à deux trains circulant sur le même itinéraire. Cette condition impose six éléments de matrice supplémentaires, d'où 15 + 6 soit 21 éléments de matrices au total (voir fig. 411d).

Chaque élément de matrice doit être capable d'assurer les confrontations de chaque canton d'un itinéraire avec les quatorze cantons de l'autre itinéraire du couple considéré, ce qui donne des éléments carrés à quatorze lignes et quatorze colonnes.

Sur le plan fonctionnel, chaque ligne d'un élément de matrice est interrogée par un "balayage" opéré par le "registre de balayage des contraintes" de la plaque F 1.

Les lignes sont interrogées séquentiellement et dans l'ordre croissant des numéros de cantons. La présence d'une contrainte est matérialisée par une fiche à diode qui met en relation une ligne et une colonne (fig. 48a). Les réponses de présence de contraintes apparaissent sur les colonnes qui transmettent l'information "de position des contraintes" à la "Mémoire intermédiaire" de la plaque B 28. Sur cette plaque, seul le numéro de la contrainte la plus péjorante est retenu pour constituer le "poids" de la contrainte à transférer au compteur de contrainte (C.C.) du C.A.S. (voir chargement des contraintes : fig. 410b).

Chaque groupe de quatre éléments de matrices possède une plaque logique d'entrée dite "entrée base contraintes" et une plaque logique dite "sortie base contraintes". Le balayage attaque toutes les matrices simultanément, mais une sélection doit être faite étant donné que le C.A.S. ne peut recevoir qu'un seul couple de variables. C'est la raison d'être des signaux d'autorisation en provenance de F 5 qui sont émis uniquement pour le couple de variables traité en liaison avec la logique d'affectation (plaque sélection).

B) Réalisation

Chaque élément est formé par des matrices à broches type Sealectroboard à deux plans de repérage.

4.812 - La matrice de pondération des cantons (voir fig. 48a)

A) Point de vue théorique

Une telle matrice doit offrir la possibilité d'affecter un poids variable de 1 à 31 pour chaque canton de chaque itinéraire et pour chacune des marches. Le dimensionnement sera donc de 14 x [6 x 3] . En effet un itinéraire est divisé en quatorze segments et comprend trois "sous-itinéraires" correspondant aux marches. Les colonnes (6 x 3) sont sensibilisées par des signaux en provenance de la matrice d'affectation et par suite de la plaque F 6 qui autorise l'interrogation par un signal provenant de B 19.

Le transfert du poids du canton recopié est piloté par le balayage généré par F 1. Ces valeurs sont communiquées au C.A.S. sur les chaînes "Maître" et "Esclave" par l'intermédiaire de la plaque d'interface "Pondération - C.A.S." A 17.

B) Réalisation

Deux éléments de matrice (de cinq cantons) et un élément (de quatre cantons) forment l'ensemble de "la matrice de pondération des cantons". Ce sont également des matrices à broches type Sealectroboard à deux plans de repérage. Chaque élément est attaqué par une plaque logique dite "entrée base pondération". La sortie comporte aussi une plaque logique dite "sortie base pondération". La liaison entre colonnes et lignes est assurée par des fiches à diode.

Notons que ces matrices permettent, par affichage de poids sur les cantons, de prendre en compte la vitesse théorique maximum des trains sur leur itinéraire. Cette vitesse sera respectée s'il n'y a pas de conflit, dans le cas contraire, la différence entre le nombre de pas $\gamma$ imprimés sur la MAE et le poids affiché sur la matrice pour un canton donné, permettra d'évaluer le retard en temps, accusé par le train par rapport à sa marche théorique.

4.813 - La matrice d'affectation (voir fig. 48a)

Son rôle est d'adresser les trains repérés par des lettres (a, b, c, ... p) sur les itinéraires et sur les marches qu'ils doivent suivre. Cette matrice est formée de quatorze lignes (une ligne par train) et de dix-huit colonnes qui transfèrent l'information d'affectation des trains vers la plaque F 6 qui redistribue ces conditions sur la matrice de pondération.

La liaison entre lignes et colonnes est assurée par des fiches à diode. La matrice est également du type à broches avec deux plans de repérage.

4.814 - Matrices "canton arrivée - canton départ" (voir fig. 48a)

Elles permettent de prévoir l'origine et le but de chaque train. Pour des raisons de commodité technologique, ces matrices sont regroupées. En conséquence, elles sont formées par une matrice à trois plans. Le premier plan commun est valable pour l'entrée tandis que le deuxième correspond aux cantons "départ" et le troisième aux cantons "arrivée".

Le balayage donné par la plaque F 2 attaque les quatorze colonnes correspondant aux quatorze cantons. Les quatorze trains sont affectés sur les quatorze lignes du deuxième et du troisième plan. Ceci donne 28 liaisons (14 pour le départ et 14 pour l'arrivée) avec les plaques F 3 et F 4 qui permettent de transférer SD et SA vers les modules trains et vers le C.A.S.

Les relations entre les premier et deuxième plans et les premier et troisième plans sont assurées par des fiches ordinaires.

4.815 - La matrice position initiale sur le canton (fig. 48a)

Elle a pour but d'initialiser finement la position des trains sur leur canton de départ. Sa raison d'être est de permettre la succession sur le même itinéraire et pour la même marche de deux trains qui auraient des situations de départ différentes.

Il en résulte que le poids du canton de la matrice des contraintes correspondant au canton départ est remplacé par le poids affiché sur la matrice de position initiale. Ce poids affiché correspond au nombre de temps élémentaires que le train doit effectuer pour quitter son canton de départ.

4.816 - La matrice d'affichage de la hiérarchie intervariables

Elle permet de classer les variables suivant le système de préférence de l'homme afin de lever les ambiguïtés sur les actions doubles en sortie du C.V.C.

Le registre de balayage de la hiérarchie (HIV) sensibilise séquentiellement quatorze points classés dans l'ordre numérique de la matrice. Un ensemble de quatorze fiches représentant les trains peut être classé dans l'ordre précédent qui donnera l'ordre d'interrogation HIV des variables.

4.817 - La matrice "trains inscrits"

Elle offre la possibilité de n'inscrire sur le listing MAE qu'un certain nombre de variables, les autres étant naturellement traitées par la M.A. Un balayage est provoqué par la plaque F 7. La sortie attaque l'ampli "train inscrit" de la plaque F 5. La liaison entre ligne et colonne est assurée par fiche à diode.

## 4.82 - *L'ensemble logique de traitement des entrées*

### 4.821 - Plaque de balayage (F 1) - (fig. 48b)

Le rôle de cette plaque est de provoquer une interrogation successive des lignes des matrices : interrogation que l'on appelle balayage.

Un registre de quatorze bits permet d'effectuer le balayage de la matrice des contraintes qui est déclenché par le timing β (B 19) au moment des recopies sur C.A.S. (connecteur 5). Ce registre permet également de balayer les quatorze cantons de la matrice de pondération. Ce balayage est déclenché par la "recopie itinéraire" (connecteur 6).

Un deuxième registre de quatorze bits également, effectue le balayage de la matrice "hiérarchie", qui est déclenché par "installation de la hiérarchie" (connecteur 25) venant de C 23.

### 4.822 - Plaque d'inscription (F 2) - (fig. 48b)

Cette plaque réalise le balayage de la matrice "canton arrivée et canton départ" grâce à un registre de quatorze bits. Le balayage de la matrice "position initiale sur le canton" est effectué par le couplage en série d'un autre registre de dix sept bits au précédent afin d'obtenir 31 bits correspondant aux 31 positions possibles sur un canton.

Notons qu'une bascule E 1 mémorise la commande de trains mis sur réseau et que la recopie itinéraire sur C.A.S. est déclenchée par B 19 en même temps que la recopie pour F 1.

### 4.823 - Plaques d'amplification F 3/F 4 (fig. 48b)

Ces plaques ont pour rôle essentiel d'amplifier les signaux de sortie des matrices "canton initial et final" et "position initiale sur le canton". Une porte ET n'autorise la recopie sur C.A.S. que pour les trains qui sont sélectionnés par F 7.

### 4.824 - Logique choix voies F 5 (fig. 48b)

Cet ensemble logique détecte si l'ordre lexicographique des variables correspond à l'ordre des numéros croissants des itinéraires parcourus par ces variables.

Exemple :

Les variables a, b, c peuvent être respectivement affectées aux itinéraires I, II et III. Dans ce cas, il y a concordance entre la séquence d'exploration des variables et la séquence de balayage des itinéraires. La suite ab, ac, bc concorde avec la suite (I, II), (I, III), (II, III).

Par contre si a était affecté à l'itinéraire III et c à l'itinéraire I, il y aurait non concordance entre les deux suites ci-dessus.

De plus, elle permet d'affecter aux voies d'entrée V E les variables premières dans l'ordre lexicographique, ce qui revient à affecter en premier lieu à l'axe vertical de la matrice des contraintes, les variables les mieux placées lexicographiquement lorsqu'il y a un dilemme.

4.825 - Plaque logique d'affectation (F 6) - (Fig. 48b)

Cette plaque permet l'interrogation de la matrice des pondérations d'après les informations provenant de la matrice d'affectation et seulement à l'instant prévu par le timing β (B 19). Par ailleurs les informations de "sortie voie" sont communiquées à la "logique choix voie" F 5.

4.826 - Plaque "sélection manuelle" F 7 (fig. 48b)

Son rôle est d'enregistrer les trains sélectionnés sur réseau et de transmettre ces informations (sous réserve que la machine soit en état de les recevoir : autorisation de sélection manuelle) vers les modules trains et les matrices "affectation" et "trains inscrits".

*4.83 - Le pupitre d'exploitation*

4.831 - Le tableau de commande (voir fig. 411e)

Il permet de réaliser les fonctions suivantes :

- TRAINS MIS SUR RESEAU (par touches "piano") ;
- TRAINS PRIORITAIRES (par touches "piano") ;
- SECTEUR (mise sous tension de la M.A.) ;
- HORS RESEAU : permet d'effacer un train sur réseau ou prioritaire. Notons que cette fonction permet aussi de procéder à un routage sans prendre en compte la matrice des contraintes. Cette fonction est particulièrement intéressante pour contrôler l'affichage de la marche théorique des trains ;
- RAZ : remise à zéro logique de l'ensemble des bascules de la "M.A." ;
- ARRET : permet de stopper l'évolution d'un problème tout en figeant la situation au moment de l'arrêt. Il est possible de poursuivre le traitement sans avoir à le recommencer depuis le début ;
- ROUTAGE : c'est l'ordre de démarrage du traitement ;
- ROUTAGE LIMITE : permet de faire évoluer le problème pendant un certain nombre de pas γ ;
- ARRET 1er TRAIN ROUTE : le traitement du problème est automatiquement arrêté lorsque le premier train sort de la configuration prise en compte par la "M.A." ;

- STATIQUE - DYNAMIQUE : fixe l'un ou l'autre de ces deux modes de fonctionnement ;
- MANUEL MAE : pour le fonctionnement de la MAE seulement sur demande de l'opérateur ;
- PERIODIQUE MAE : pour le fonctionnement automatique de la MAE ;
- ROUES CODEUSES m (à trois décades) : permettent d'afficher le nombre m de pas $\gamma$ pour le routage limité ;
- ROUES CODEUSES n (à deux décades) : permettent d'afficher la période d'impression n en nombre de pas $\gamma$ de la MAE.

4.832 - Les affichages divers (voir panneaux D fig. 411e)

- HIA individuelle : prévoit l'affichage de la hiérarchie interactions pour chaque variable ;
- niveaux de priorité : se fait par des "cirdjets" implantés sur les plaques "modules trains" ;
- HIA commun - individuel et "0 ou 1" : obtenus par deux cirdjets implantés sur la plaque C 23 ;
- IMPRESSION de HIV : permet d'obtenir une impression en rouge pour les variables qui ont fait l'objet d'un choix par HIV en sortie du C.V.C. Cette fonction est obtenue par un jeu de cirdjets implantés sur les plaques C.V.A. et sur les plaques sélection ;
- IMPRESSION de HIA : permet l'impression en rouge des variables qui ont fait l'objet d'un choix par hiérarchie interactions en sortie du C.V.C. Cette fonction est réalisée par le même jeu de cirdjets que pour HIV, mais positionnés en HIA.

## 4.9 - REALISATION PHYSIQUE des SORTIES

### 4.91 - La machine à écrire électrique (M.A.E.)

#### 4.911 - Généralités

Cette machine imprime l'ordonnancement des trains sous forme de diagrammes "espace-temps".

C'est une machine à écrire automatique "émettrice-réceptrice" IBM 73. Grâce à des contacts et des électro-aimants, elle peut émettre ou recevoir des informations alphanumériques sur un réseau à fils.

#### 4.912 - Caractéristiques principales

- émettrice-réceptrice imprimante série,
- vitesse d'impression : 15,5 caractères/seconde,
- ligne d'écriture : 102 caractères,
- impression noire et rouge,
- codage réception sur sept canaux parallèles,
- 44 touches imprimantes, émettrices sur sept canaux parallèles,
- largeur du papier : 28 cm,
- retour tête : 42 cm/seconde,
- alimentations électriques : moteur 220 V ~
  électro-aimants 48 V,
- masse : 24 kg.

### 4.92 - La matrice "configuration des voies" (fig. 49a)

Elle a pour rôle de localiser géographiquement la plage d'impression des variables sur la feuille d'impression de la machine à écrire.

Elle est formée par deux éléments de matrice adjacents à deux couches. Chaque élément de matrice représente 25 colonnes de la feuille MAE. Tout se passe comme si les deux éléments étaient côte à côte pour décrire les 50 colonnes de la feuille complète.

Chaque élément de matrice comporte quatorze lignes susceptibles de recevoir les fiches des trains à inscrire en provenance des "modules-trains". Chaque variable est repérée par ses quatorze cantons possibles d'inscription. Ce groupement de quatorze peut occuper une place quelconque sur les 50 points disponibles par ligne.

A chaque position de fiche (caractéristique d'un canton i), pour un train donné, correspondra une position géographique précise du listing pour l'impression du dit train au moment où il franchira le canton i. Les colonnes des éléments de matrice sont dirigées vers les plaques logiques de sortie F 8 et F 9.

## *4.93 - Les logiques de sortie*

### 4.931 - La logique de commande de la machine à écrire (A 2) - (voir fig. 49e)

Chaque impression de la machine à écrire est mémorisée sur cette plaque par l'élément CFF de mémorisation impression pendant la durée de son exécution. Cette mémorisation déclenche le cycle d'exécution.

Cette mémorisation se fait de deux façons :

- par commande manuelle (sous réserve que la MAE soit en attente) ;
- par commande d'impression automatique (à la fin d'une RAZ $\gamma$ sous réserve que le décompteur de pas avant impression soit à zéro).

Dès que la "Mémoire Active" aura entamé un nouveau cycle, le décompteur de pas (D 4) est ramené à la valeur affichée par l'opérateur sur les roues codeuses. Le blocage MAE dure deux temps afin de permettre la RAZ asynchrone et la recopie. Notons qu'à chaque pas $\gamma$ le décompteur est décompté de 1, mais si la commande d'impression automatique n'est pas utilisée, le compteur est bloqué à zéro.

L'impression débute par un passage sur "Majuscules", car la "RAZ test" a eu pour effet de ramener à une commande minuscule. La mémorisation de l'ordre "Majuscules" à exécuter se fait grâce à un monostable clocké constitué par le CFF de mémorisation d'impression et de son suiveur. La progression des ordres se fait au rythme de la MAE. Un CFF de "mémorisation machine" est positionné grâce à deux détections permettant de savoir si la MAE est disponible ou indisponible. Un signal durant un temps d'horloge permet de faire progresser les ordres dans leur registre de sélection.

L'utilisation des ordres par la MAE est autorisée dès que celle-ci redevient disponible grâce à une série de NAND. Les cinq premiers ordres systématiques sont : la commande majuscule, la commande d'impression des centaines, des dizaines, des unités et le nombre de pas $\gamma$ effectués depuis le début de l'ordonnancement.

Ces chiffres successifs sont mémorisés dans les trois décades qui sont comptées à chaque pas $\gamma$ et envoyées ensuite sur la plaque (A 5) de commande des électro-aimants. L'impression de ces trois chiffres est suivie systématiquement d'un passage sur "minuscules".

Le début de l'action "passage en minuscules", la machine devenant indisponible, sera suivi par la mémorisation du premier bit du registre de sélection de train pour impression (plaques "sélection").

Cette sélection se poursuit jusqu'à achèvement et permet de détecter si, sur la première colonne d'impression, il y a une ou plusieurs lettres à imprimer avec éventuellement une impression en rouge pour signaler que cette lettre est impliquée dans un choix imposé par hiérarchie (HIV).

Cette éventualité est prise en compte dans le CFF de "mémorisation couleur". La présence d'une impression à faire est détectée sur l'entrée 43. A la fin du registre d'interrogation des trains, sont activés : le CFF de "mémorisation tabulation", le CFF "d'espacement", le CFF "d'impression" puis de "retour tête avec interligne" si aucune détection d'impression n'a été faite, puis le "double comptage d'espacements" si l'on se trouvait sur une colonne autre que la dernière colonne d'impression.

Simultanément à ces mémorisations, il faut ajouter une unité au compteur de colonnes de la logique de sortie de la matrice de configuration des voies.

Notons que le compteur d'espacement est décompté de un chaque fois qu'une impression est faite, car une impression est toujours suivie d'un espacement automatique dont il faut tenir compte pour les impressions ultérieures.

Notons également que le début du retour de tête est accompagné d'une remise à zéro des CFF de mémorisation impression de commande retour tête et interligne, mémorisation couleur, comptage de un du compteur de colonne de la logique de sortie de la matrice de configuration des voies.

La remise à zéro des décades de centaines, dizaines et unités du compteur de nombre de pas $\gamma$, de tabulation et d'espacements est faite grâce à la propriété des compteurs de JOHNSON de transférer sur les autres bits un zéro imposé sur le premier.

4.932 - La commande des électro-aimants MAE (A 5) - fig. 49d)

Elle comprend un "registre logique MAE" à quatorze bits, dont chacun correspond à l'une des lettres de repère des variables. Chaque signal d'identité de variable attaque un amplificateur de puissance capable d'éliminer les électro-aimants de la MAE.

4.933 - Logique de sortie de la matrice configuration des voies F 8 - F 9 (voir fig. 49c)

Elle comprend une batterie d'amplificateurs permettant d'attaquer les organes de puissance de la MAE. Un compteur de colonnes à cinq bits commande la position du chariot MAE en fonction des résultats donnés par la "matrice configuration des voies".

4.934 - Amplification des voyants A 8 - A 11 (fig. 49b)

Ces plaques amplifient les signaux en provenance des "modules-trains" afin d'allumer les voyants du tableau de commande.

## 4.10 - ORGANIGRAMMES

### 4.101 - Organigramme général

Sur les fig. 410a des pages suivantes nous avons représenté l'organigramme général simplifié de la machine. En outre nous avons montré les différentes phases principales intervenant dans l'élaboration des solutions d'un problème donné et qui se succèdent comme suit :

- affichage des données,
- remise à zéro logique de l'électronique,
- mise sur réseau des variables (avec priorité s'il y a lieu),
- routage, chargement du problème,
- chargement du C.A.S.,
- temps β,
- élaboration du pas γ,
- impression des résultats de la stratégie engagée.

### 4.102 - Organigrammes partiels

A) Chargement des contraintes

Cette chaîne représentée par la fig. 410b montre le processus de transfert sur les compteurs CC du C.A.S. de la contrainte la plus péjorante pour une ligne.

B) Remise à un du C.A.S.

Avant chargement les compteurs de l'axe Y du C.A.S. sont remis à un par C 14 et B 19 suivant la fig. 410c.

### 4.103 - Organigramme temporel

A) Temps β

La fig. 410d montre chronologiquement les différentes opérations qui ont lieu au cours du temps β qui dure au total 2 048 temps d'horloge. Ceci permet d'établir une relation donnant le temps de traitement théorique de la "Mémoire Active".

B) Temps de traitement théorique

Les opérations sur le C.A.S. étant pilotées par une horloge qui émet des séquences de 2 048 temps à une fréquence de 2 MHz, il en résulte une durée d'environ 1 ms pour le timing β.

Cette durée représente le temps nécessaire pour effectuer un parcours C.A.S., charger les C.V.A. et enregistrer les interdictions d'actions dans les C.V.C.

A ce temps doit s'ajouter le délai de remise à zéro du C.A.S. ainsi que la durée d'élaboration du pas γ. On peut évaluer un temps moyen de 0,5 ms pour chaque C.A.S. Il faudra donc compter en moyenne 1,5 ms par C.A.S.

Pour définir un pas γ on doit explorer séquentiellement les $C_8^2 = 28$ C.A.S. et si L est le module de la solution en pas, le temps d'élaboration d'une trajectoire sera :

$$t_{8MA} = 1{,}5 \times 28 \times L \rightarrow \text{m.s}$$

$$\boxed{t_{8MA} = \frac{3}{2} \cdot 28 \cdot L \rightarrow \text{m.s}}$$

D'une manière générale si n est le nombre de variables mises sur réseau, le temps de calcul en m.s sera donné par la relation :

$$\boxed{t_{\underset{\text{ms}}{NMA}} = \frac{3}{2} \cdot C_n^2 \cdot L}$$

## 4.11 - APERCU sur la REALISATION

### 4.111 - Présentation générale (voir photo 411b)

Le combinateur se présente sous la forme de deux meubles :

- une baie électronique système RACK standard ;
- un pupitre d'exploitation comprenant les systèmes d'entrée et de sortie, les différentes commandes ainsi qu'une table de travail.

### 4.112 - Aperçu descriptif (fig. 411c)

Les points d'accès de l'opérateur se répartissent suivant quatre panneaux :

- panneau A (fig. 411d) formé de matrices et de fiches ;
- panneau B (fig. 411e) constitué par le pupitre d'exploitation ;
- panneau C (fig. 411e) représentant la matrice de configuration des voies ;
- panneau D (fig. 411e) qui servent à l'affichage des niveaux de priorité, des hiérarchies et des types d'impression M.A.E.

La baie électronique (voir fig. 411a2) est formée de quatre Racks repérés A, B, C, D. Chaque plaque logique est repérée par la lettre désignant le rack qui la contient, le numéro suivant la lettre indique le numéro du châssis connecteur (32 au maximum). Exemple : A 2 désigne la plaque du rack A qui est implantée sur le châssis n° 2 (logique M.A.E).

La partie inférieure de la baie est occupée par les trois alimentations électriques dont le schéma simplifié est donné par la fig. 49f. Notons qu'un transformateur d'isolement avec écran électrostatique permet de protéger la logique contre les parasites haute fréquence venant de l'extérieur. Par ailleurs, un dispositif de sécurité (système Vigilohm) protège l'opérateur contre les mises à la masse accidentelles des phases d'alimentation.

Le panneau A comporte un certain nombre de plaques réalisant la logique d'entrée-sortie des matrices. Ces plaques sont repérées :

- F pour l'ensemble logique d'exploitation ;
- G pour la matrice des contraintes ;
- H pour la matrice des pondérations.

### 4.113 - Volume de l'électronique

L'électronique est implantée sur 83 plaques logiques (avec huit variables), ce qui représente environ 2 500 éléments de circuits intégrés.

Pour prendre en compte quatorze variables, il faudrait 116 plaques logiques, soit 3 500 éléments de C.I.

Une boîte de test électronique a permis de vérifier le fonctionnement de chaque plaque au moment de la conception et est utilisée à présent pour assurer la maintenance.

### 4.114 - Evaluation du taux de fiabilité du combinateur

Nous supposerons que l'élaboration d'une solution correcte suppose le bon fonctionnement de tous les circuits. Autrement dit, nous considérerons que la rame d'un seul élément entraîne une panne pour la machine (pas de redondance).

Pour une technologie D T L, le taux intrinsèque estimé dans les revues américaines pour un élément de circuit intégré, est de $3.10^{-7}$ avec l'hypothèse de quarante heures de mise sous tension par semaine.

Dans le cas du combinateur, on peut estimer qu'il est mis sous tension trente cinq heures par semaine, ce qui entraîne un temps moyen de bon fonctionnement :

$$MTBF = \frac{1}{3.10^{-7}.2500.35} \text{ semaines}$$

| M T B F $\sim$ 43 semaines soit 10 mois |
|---|

*Remarque :*

Ce chiffre de dix mois montre qu'une maintenance périodique est souhaitable afin de se prémunir contre les pannes. Deux méthodes sont envisageables :

1) passer régulièrement sur la machine des problèmes de test dont les solutions doivent être reproductibles ;

2) procéder à des révisions périodiques complètes des plaques par contrôle systématique sur la boîte de test.

# CHAPITRE 5

## Evaluation des performances

## INTRODUCTION

Le combinateur électronique du chapitre IV étant construit en respectant le "quintuplet d'hypothèses de base" établi en fonction de considérations purement neurophysiologiques, il fallait entreprendre des études de longue haleine dans cinq directions.

1) Définir une méthode d'exploitation permettant d'obtenir le maximum de résultats de cette machine telle qu'elle était réalisée.

2) Juger des possibilités combinatoires d'une structure entièrement nouvelle et surtout de la validité des stratégies envisagées dans un objectif de travail "en temps réel".

3) Examiner les modifications nécessaires à son perfectionnement tant sur le plan fonctionnel que sur le plan des entrées et sorties des données.

4) Etablir la formulation et l'adaptation de problèmes d'ordonnancement concrets afin de définir une méthode de dialogue homme-machine, de juger de la souplesse ainsi que des performances de l'innovation.

5) A la lumière des indications ci-dessus, définir la structure d'une machine opérationnelle intégrée dans un système cybernétique.

## 5.1 - EXERCICE PEDAGOGIQUE à TROIS DIMENSIONS DIT "PROBLEME du CUBE"

### 5.11 - Généralités

Le but de cet exercice avant tout pédagogique est de montrer par la représentation spatiale d'une trajectoire, l'image de la stratégie engagée, le principe d'entrée des données, le mode de travail ainsi que l'exploitation des résultats du combinateur "Mémoire Active".

### 5.12 - Enoncé du problème

Considérons un trièdre trirectangle orthonormé d'axes X, Y, Z (voir fig. 51a) gradués de 1 à 5. Aux axes X, Y, Z on peut affecter respectivement trois variables a, b,c de la machine. Chacun des plans ab, bc, cd forme l'image des $C_3^2$ couples de variables pris deux à deux qui représentent les trois C.A.S. ab, bc, cd de la machine.

Supposons que dans le plan ab, les cases (X = 3, Y = 3) ; (X = 3, Y = 4) ; (X = 4, Y = 3) ; (X = 4, Y = 4) soient interdites. Elles sont repérées par la surface hachurée en rouge sur la fig. 51a. Dans la théorie de la Mémoire Active, nous avons vu que les volumes de contrainte étaient des cylindres orthogonaux aux plans de projection (les C.A.S.). Ici la contrainte entre les variables a et b formera dans l'espace un volume de contrainte parallélépipédique (poutre rouge de la fig. 51a).

Supposons que dans le plan bc, la surface interdite hachurée en bleu recouvre les cases (Y = 3, Z = 2) ; (Y = 4, Z = 2). Le volume interdit sera figuré par la pourte noire perpendiculaire au plan bc. Si dans le plan ac, les cases (X = 3, Y = 2) et (X = 4, Y = 2) hachurées en vert sont interdites, l'image du volume de contrainte sera donnée par la poutre verte perpendiculaire au plan ac. Finalement dans l'espace, le volume interdit formera un "croisillon" donné par la fig. 51b.

Supposons que les cubes repérés SD et SA respectivement de coordonnées (X = 1, Y = 2, Z = 1) et (X = 5, Y = 5, Z = 4) figurent les points "Situation de départ" et "Situation d'arrivée". Pour la machine, l'énoncé du problème se trouve complètement matérialisé par la fig. 51c. L'objet de l'exercice sera de déterminer la trajectoire la plus courte qu'il sera possible de former avec des cubes juxtaposés ayant une face, une arête ou un sommet communs, pour relier les cubes SD et SA en contournant les volumes interdits (formés par le croisillon de menuisier).

Le passage d'un cube de la trajectoire orientée au cube immédiatement voisin, donne l'image du vecteur $\vec{\gamma}$ entrepris par la machine dans un espace à trois dimensions.

En prenant l'exemple de la fig. 51h :

- la transition cube SD → cube 1 (une face commune) correspond à : $\vec{\gamma}1$ → X = 0, Y = 0, Z = 1

- la transition cube 1 → cube 2 (un sommet commun) correspond à : $\vec{\gamma}2$ → X = 1, Y = 1, Z = 1

- la transition cube 2 → cube 3 (une arête commune) correspond à : $\vec{\gamma}3$ → X = 0, Y = 1, Z = 1

## 5.13 - *Etablissement de la "feuille de dialogue" (fig. 51j)*

Nous affecterons les variables aux itinéraires suivants :

a → I b → II c → III

Les surfaces de contrainte précédemment définies se traduisent par les interdictions à afficher sur la matrice des contraintes entre les itinéraires I → II, I → III et II → III.

Ayant fait l'hypothèse que la description de la trajectoire de l'espace se faisait uniquement par transition d'un cube au cube immédiatement voisin, il convient d'affecter le poids 1 aux segments 1, 2, 3, 4, 5 de la "marche 1" des itinéraires I, II et III. Un poids de deux signifierait que la variable progresse par saut de deux cubes (ce qui n'est pas le cas dans le problème considéré).

Dans la matrice d'affectation, il faut afficher les variables a, b et c sur la "marche 1" des itinéraires correspondants. La situation de départ des variables correspond aux coordonnées du cube SD (X = 1, Y = 2, Z = 1). De même la situation d'arrivée est donnée par le cube SA (X = 5, Y = 5, Z = 4). Ces valeurs d'origine et de but sont affichées pour chaque train sur la matrice "canton initial et final"

Sur la matrice "Position finale sur le canton", nous devons afficher "1" pour chaque variable a, b et c, ce qui signifie que chacune d'elles doit faire 1 pas à partir de la situation de départ pour changer de segment.

Pour envisager le premier essai, nous travaillerons avec les paramètres de fonctionnement suivants :

- routage global,
- impression automatique, en "intervariables", de tous les pas (n = 1),
- trains a, b, c inscrits,
- hiérarchie intervariables (a, b, c),
- hiérarchie interactions (a = 1, b = 1, c = 1),
- fonctionnement en commun (1 en tête).

## 5.14 - *Entrée des données du problème sur la machine (fig. 51j)*

Les affichages consignés sur la "feuille de dialogue" étant réalisés sur les organes d'entrée de la machine, celle-ci est prête pour le traitement :

- séquence des manoeuvres à réaliser pour "lancer" un problème

1) appuyer sur secteur ;
2) appuyer sur RAZ : le voyant "attente" s'allume. Cette information indique que la machine est prête pour prendre en compte dans ses "centres logiques" les données du problème affiché ;
3) mettre a, b et c sur réseau en enfonçant les touches "a", "b" et "c" puis "sur réseau". En retour logique, les voyants "a", "b", "c" de "trains mis sur réseau" s'allument ;
4) appuyer sur "périodique MAE" ainsi que sur "Stat" pour fonctionner "en statique" ;
5) appuyer sur "routage". Cette manoeuvre déclenche le traitement du problème suivant le processus vu dans l'organigramme général du chapitre IV.

La machine nous renseigne sur la stratégie qu'elle a engagée, par impression de la position des variables tous les pas $\gamma$. Au niveau de sept pas, le voyant "routage" s'éteint, le problème est complètement résolu. La valeur 7 reste cependant disponible dans le décompteur D 1. En appuyant sur "MANUELLE MAE" il est possible d'obtenir une nouvelle impression de la longueur totale 7 de la stratégie. Cette valeur sera effacée par appui sur RAZ qui ramène la machine dans l'état 2) ci-dessus.

## 5.15 - *Modes de fonctionnement (voir listing 51 k)*

Mode 1 : routage global

A) Avec les paramètres de fonctionnement du paragraphe 5.12, nous obtenons ce mode qui donne la stratégie en sept pas représentée sur la fig. 51d. Notons que sur cette figure, le cube SA est atteint en six temps (SA porte le n° 6). Or il faut ajouter un temps pour permettre à la dernière variable de franchir le pas représenté par ce cube lui-même. Le numéro du dernier pas imprimé sur le listing indique le nombre d'actions qui correspond au nombre de cubes plus un. Cette particularité est due au fait qu'une variable est considérée "routée" lorsqu'elle est sortie de son segment "but".

B) Lecture du mode 1 du listing 51 k :

- temps 000, nous avons la situation initiale suivante :

a : canton 1 de l'itinéraire I
b : canton 2 " II
c : canton 1 " III

- temps 001,

  a : passe du canton 1 au canton 2
  b : passe du canton 2 au canton 3
  c : reste sur le canton 1

- temps 002,

  a : stationne sur le canton 2
  b : passe de 3 à 4
  c : stationne sur 1

- temps 003,

  a : stationne sur 2
  b : passe de 4 à 5
  c : passe de 1 à 2

- temps 004,

  a : passe de 2 à 3
  b : sort de 5 et se trouve routé
  c : passe de 2 à 3

- temps 005,

  a : passe de 3 à 4
  b : est routé
  c : passe de 3 à 4

- temps 006,

  a : passe de 4 à 5
  c : sort de 4 et se trouve routé

- temps 007,

  a : sort de 5 et se trouve routé

Le dernier temps donne le "module" de la stratégie envisagée pour la machine.

Mode 2 : routage limité

Il est obtenu par affichage de m = 3 sur les roues codeuses "routage limité" et par appui sur le poussoir "routage limité" au moment de l'affichage des données. Ce mode permet d'introduire de nouvelles données au cours du traitement d'un problème (satisfaction de l'hypothèse H 4 sur l'adaptation). L'état du problème au pas 003 est conservé en mémoire et il devient possible de le faire évoluer de nouveau en appuyant sur "routage".

Mode 3 : arrêt train routé

Ce mode est obtenu par appui sur le poussoir "arrêt train routé" au moment de l'affichage. Le traitement du problème est stoppé dès que la première variable est sortie de la configuration prise en compte par la machine (temps 004). En appuyant de nouveau sur "routage", il est possible de le relancer comme en mode 2.

Mode 4 : arrêt en cours de traitement

Le poussoir "arrêt" permet d'interrompre un traitement à n'importe quel pas. La commande d'arrêt est enregistrée et devient active dès que la machine a déterminé l'élaboration et l'impression (éventuellement) du pas γ qui était en cours. La commande d'arrêt permet de figer le problème pour une cause quelconque de manipulation. Comme en mode 2, le relancement est possible en envoyant "routage".

Mode 5 : routage sans impression

Dans ce cas la machine à écrire ne fonctionne pas. La Mémoire Active traite complètement le problème sans que l'on possède d'informations sur la manière dont elle l'a résolu. Seul le "module" de la stratégie est conservé et peut être obtenu en impression par appui sur le poussoir "manuel MAE".

Mode 6 : impression tous les n pas γ

Cette méthode permet de gagner du temps en impression tout en conservant l'histogramme du traitement. Evidemment la précision des informations est moins bonne qu'en imprimant tous les pas, car on ne connaît pas l'évolution de l'exercice entre deux pas imprimés.

*5.15bis - Solutions du problème du cube (voir listing 51 m)*

Résultat 1 (fig. 51d)

Sans priorité, hiérarchie intervariables : abc, hiérarchie interactions (a = 1, b = 1, c = 1) impression en intervariables.

Ce résultat correspond à l'explication donnée pour le mode 1. Aucune variable n'est prioritaire. L'ordonnancement est réalisé en sept pas.

Résultat 2 (fig. 51f)

C prioritaire, hiérarchie intervariables cba, hiérarchie interactions (a = 1, b = 1, c = 1) impression en intervariables.

Cet ordonnancement respecte la condition c prioritaire. Au deuxième pas, a et b sont imprimés en rouge, ce qui signifie qu'il y a eu choix par interrogation de la hiérarchie intervariables. Notons que b était classé avant a en affichage hiérarchique, par conséquent au pas 002 c'est b qui progresse et a qui stationne.

Résultat 3 (fig. 51g)

C'est le même affichage que pour le résultat 2, cependant on a permuté a et b en affichage hiérarchique. Il en résulte qu'au pas 002, c'est la variable a qui progresse tandis que b stationne. Notons que l'ordonnancement se fait toujours en sept pas.

Résultat 4 (fig. 51n)

C prioritaire, hiérarchie intervariables abc, hiérarchie interactions (a = 0 au pas 1, a = 1 pour les pas suivants, b = 1, c = 1) impression en interactions.

Le but de cet essai est de montrer que le mode d'impression dit en "interactions" permet de repérer en rouge les variables qui ont fait l'objet d'un choix, suite à l'interrogation de la hiérarchie interactions.

Au pas 001, la variable a stationné parce que l'action 0 de cette variable est classée première hiérarchiquement. Au pas 002, la variable a progressé puisqu'à ce stade, c'est l'action 1 qui est classée première hiérarchiquement. Notons que la variable b fait l'objet d'un choix par hiérarchie interactions aux pas 002 et 003 et que de nouveau au pas 004, la variable a est imprimée en rouge pour les mêmes raisons.

Résultat 5

C prioritaire, hiérarchie intervariables a, b, c, hiérarchie interactions (a = 0, b = 1, c = 1) impression en interactions.

Le résultat montre que les effets combinés de la priorité, de la hiérarchie interactions, de la hiérarchie intervariables peuvent conduire à des stratégies de longueur différente. Ici on obtient neuf pas au lieu de sept[1]. Aux temps 002, 003, 004, la variable a stationné car elle choisit de faire l'action 0 parmi les deux actions possibles. Ce résultat montre que le système de préférence donné par l'homme peut conduire la machine à envisager des solutions qui aient tendance à satisfaire l'homme, plutôt que le critère du minimum de pas.

Lorsque l'homme n'a aucune préférence sur l'ordre de passage des variables, il faut cependant afficher un ordre arbitraire (hiérarchie intervariables ou interactions) et la machine se trouve dans un état qui ne conduit pas forcément à la solution optimum optimorum. C'est à ce niveau que se situe la partie heuristique des structures "mémoires actives". Des études plus poussées sur ce sujet feront l'objet du paragraphe 5.322.

## *5.16 - Extrapolation du "problème du cube"*

Si on considère un modèle à trois dimensions, chacune étant quantifiée en 100 parties, ce volume contient $100^3$ points définis par les quantifications. L'hypothèse selon laquelle chaque élément de mémoire est lié de façon aléatoire à tous les points qui l'entourent à une cote près, entraîne 26 relations possibles entre un point M et tous les points immédiatement voisins.

Supposons pour simplifier que l'évolution se fasse toujours dans le même sens sur chaque axe, cela revient à dire qu'à partir du point M, il est possible d'effectuer huit actions différentes. Et, à partir de ces nouveaux points, huit actions nouvelles sont encore réalisables (voir fig. 516a).

(1) Un autre exemple de mauvaise solution est donné par la fig. 51e

Chercher un chemin optimum dans un tel réseau (compte tenu du fait que certaines actions sont interdites), consiste à détecter la séquence la plus courte de liaison joignant un point SD à un autre point SA. On peut admettre que ce chemin passera par cent points environ.

La recherche d'un tel chemin par ordinateur se ferait par un balayage séquentiel de toutes les possibilités. Cette méthode entraînerait : $8^{100}$ opérations de recherches. En considérant qu'un ordinateur performant fasse une opération en 1 ns, il faudrait $8^{100}$ ns pour traiter un tel problème, soit environ $10^{70}$ siècles !.. tandis que le combinateur fait l'exploration du même réseau en une seconde environ.

*Nota :*

Nous avons donné cet exemple afin de montrer l'énorme avantage en temps, d'une exploration "parallèle" par rapport à une exploration "séquentielle". Il est bien certain que devant un problème précis de ce genre, il serait préférable de déterminer des algorithmes qui éviteraient à l'ordinateur d'effectuer toutes les combinaisons et par conséquent de réduire le temps. Même si avec de tels moyens, le temps de calcul était encore prohibitif, il faudrait chercher des méthodes heuristiques qui donnent un bon cheminement (hélas pas le meilleur) dans un temps raisonnable.

Conclusion

Cet exemple simple, qui est une généralisation du "problème du cube" montre que les niveaux fortement combinatoires entraînent, pour la conception de machines ou de programmes associatifs, des obstacles essentiellement de trois ordres :

1) difficulté de prendre en charge les éléments d'un graphe n dimensionnel dans un dispositif de mémoire ;
2) impossibilité, à partir d'un certain volume d'informations, de procéder à un balayage combinatoire destiné à sélectionner un cheminement satisfaisant à des critères et à des contraintes ;
3) difficulté à découvrir un algorithme "d'exploration intelligente" qui entraîne une mise en oeuvre longue et délicate (programmation).

Ces inconvénients sont essentiellement dus au mode de fonctionnement séquentiel des ordinateurs. Dans un combinateur "Mémoire Active", ils disparaissent du fait du principe de parallélisme qui est à la base de l'exploration des chemins.

## 5.2 - EXERCICES SIMPLIFIES

### 5.21 - Bifurcation simple de voies de chemin de fer

#### 5.211 - Enoncé

Considérons deux voies convergentes représentées par les itinéraires I et II de la fig. 52a. Ces itinéraires sont subdivisés en sept segments (ou cantons). Les trains a et b sont situés respectivement sur I 1 et II 1 et se dirigent vers la bifurcation pour atteindre le canton sept. Les vitesses des trains sur les différents segments sont repérées en unité de temps (par des chiffres arabes). L'incompatibilité de progression simultanée des trains a et b sur les cantons 4, 5, 6 se traduit par la contrainte représentée par la zone hachurée.

Le problème consiste à déterminer l'ordonnancement qui demande le minimum de temps élémentaires.

Par construction manuelle, il est simple de montrer que si b passe avant a, (par le CHI) la solution a un module de 18 pas, tandis que l'autre stratégie (par le CHS) se fait en 16 pas.

#### 5.212 - Résultats (voir listing 52b)

Le combinateur détermine lui aussi cette bonne solution en 16 pas en faisant stationner le train b au départ pendant trois unités de temps. Remarquons que cette solution correspond à un fonctionnement avec 0 en tête sur a et b. Si la progression se faisait avec 1 en tête, les trains a et b avanceraient ensemble vers l'obstacle et à partir du pas 005 le train b stationnerait trois pas afin de laisser engager le train a avant lui sur le tronçon de voie commun.

### 5.22 - Voie unique avec évitements de "nez à nez"

#### 5.221 - Enoncé

Considérons une voie unique avec deux garages g1 et g2. Supposons qu'un train a soit en I 1 et se dirige vers I 7 tandis qu'un train b situé en II 1 se dirige vers II 7. Les temps d'occupation des différents segments sont donnés par le graphique 52d. Il s'agit encore de déterminer l'ordonnancement optimum.

5.222 - Formulation du problème

Les incompatibilités de situation se traduisent par trois zones de contraintes disjointes (fig. 52e). Or, nous avons vu que d'après la structure du C.A.S., il n'était possible de prendre en compte qu'une seule zone de contrainte.

Le problème se résoud cependant en affectant une zone de contrainte par C.A.S. et en associant les C.A.S. par leurs axes.

La méthode consiste à considérer des variables fictives qu'on oblige (par des contraintes judicieuses) à évoluer de la même manière, qu'une variable de référence dite variable mère.

Si a et b sont les variables mères, on choisit les variables fictives c et d qui seront liées à la variable a par l'intermédiaire des contraintes ac, ad et dc (voir feuille de dialogue 52g). Ainsi les trois variables liées a, d et c sont nécessaires pour réaliser les trois zones de contraintes disjointes C1, C2 et C3 avec la variable b.

C1 est réalisé dans la matrice ab

C2 est réalisé dans la matrice cb

C3 est réalisé dans la matrice db

*Remarques :*

Notons que dans le cas général pour un problème à deux dimensions nécessitant n zones de contraintes disjointes il faut n + 1 variables au total dont n - 1 sont fictives sous réserve que $n \neq 2$

Pour n = 2 il faut deux variables fictives afin de réaliser une liaison rigide avec la variable mère soit quatre variables au total.

Sur le combinateur il existe six itinéraires, ce qui offre $C_6^2 = 15$ matrices de contraintes. Si on affecte deux variables fictives pour chaque variable mère il faudra six matrices pour le "couplage" des variables. Il ne reste donc que neuf matrices de libres ce qui permet de prendre en compte au maximum neuf contraintes disjointes dans un problème à deux dimensions.

5.223 - Résultats (voir listing 52 f)

Pour clarifier le graphique, seules les variables mères a et b sont imprimées. La machine donne un ordonnancement en dix huit pas, qui correspond à la trajectoire optimum déterminée manuellement sur la fig. 52e. Remarquons que c'est le train a qui devra stationner deux unités de temps supplémentaires dans le garage g2.

*Nota :*

Dans cet exercice simplifié les trains sont considérés ponctuels et les temps de parcours indiqués sur les segments tiennent compte du temps de passage sur les cantons mais aussi des temps de passage sur les zones de dégagement d'aiguille. Cela explique qu'en prenant le référentiel temps, le train a puisse sortir du garage g2 au moment où le train b venant en sens inverse y pénètre.

## 5.3 - PROBLEME d'ORDONNANCEMENT de TRAINS au DEPART sur CONVERGENCE

### 5.31 - Méthodologie

Il s'agit de mettre sur pied une méthode d'évaluation des possibilités combinatoires de la "Mémoire Active" et de construire un exercice adapté permettant de la faire travailler.

Pour juger des résultats obtenus par cette nouvelle machine, il nous a paru indispensable de procéder par comparaison en traitant par exemple un problème combinatoire P1 d'une part sur ordinateur et d'autre part sur "Mémoire Active". La confrontation des résultats donnés par chacune des deux machines permet alors de mesurer le degré de validité des solutions fournies par le combinateur qu'on étudie, sachant bien entendu que l'ordinateur est capable théoriquement de donner la meilleure des solutions possibles. Notre choix s'est porté sur un problème d'ordonnancement très combinatoire (défini plus loin) tel qu'il mette en jeu les huit variables disponibles sur la machine et qui ait malgré tout une signification ferroviaire.

### 5.32 - Objet de l'exercice

#### 5.321 - Généralités

Les premiers résultats expérimentaux tirés de la machine montraient (voir au paragraphe 5.15, essai n° 5) l'extrême difficulté de reconstituer exactement une trajectoire optimum de l'espace n dimensionnel à partir d'analyses dans les $C_n^2$ plans de projection formés par les couples de variables pris 2 à 2, étant donné qu'il n'y a pas bijectivité entre une "hyperligne" optimale et des trajectoires optimales planes qui devraient correspondre aux projections propres de cette hyperligne.

En conséquence la "Mémoire Active" se comporte comme une machine heuristique qu'on doit essayer d'exploiter au mieux. Il faut alors définir la valeur de l'heuristique, donc chiffrer les résultats d'un nombre important d'expériences et les comparer, autant que faire se peut, à ceux fournis par une machine non heuristique (s'il en exixte une).

Jusqu'à huit variables, il est possible d'utiliser un ordinateur (UNIVAC 1108 dans le cas présent) comme moyen sûr de comparaison, compte tenu du fait que le temps de calcul dans un problème à huit variables, n'excède pas quelques minutes. Au-delà de huit (à quatorze dans l'optique d'extension de la "Mémoire Active") il n'est plus pensable de s'adresser à l'ordinateur (le temps de calcul demanderait plusieurs jours !).

La seule possibilité restante, pour juger des qualités optimisantes de la "Mémoire Active" consiste à comparer ses résultats à ceux que donnerait en moyenne le hasard à la suite d'un grand nombre de tirages (plusieurs centaines afin d'avoir un échantillonnage capable de représenter à peu près correctement la fonction de répartition des modules des 14 ! solutions théoriquement possibles.

Le problème pour la "Mémoire Active" est de déterminer l'arrangement optimum optimorum parmi les (8 !) ou (14 !) possibilités ou tout au moins une solution qui ne s'en éloigne pas trop et dont l'écart sera à chiffrer. Avec quatorze variables, la solution optimum optimorum est très difficile à cerner. Le seul moyen réaliste consiste à situer la position de la solution correspondant à l'espérance mathématique des solutions élaborées par la "Mémoire Active".

Ces solutions sont en effet différentes selon la méthode d'exploitation. L'expérience montre que les points d'accès susceptibles de modifier le module des stratégies sont :

- la hiérarchie intervariables (HIV),
- la hiérarchie interactions (HIA),
- les priorités (PRIO).

Si l'espérance mathématique des solutions "Mémoire Active" pour un grand nombre d'essais est inférieure à l'espérance mathématique théorique, les propriétés optimisantes de la "Mémoire Active" seront confirmées. Il sera alors possible de chiffrer l'écart et de définir une grandeur représentative des qualités optimisantes que nous conviendrons d'appeler "Pouvoir optimisant" ou "facteur optimisant" de la "Mémoire Active". Il sera également intéressant d'examiner l'évolution de cette grandeur en fonction du nombre de variables en traçant la courbe représentative de "la fonction d'optimisation".

### 5.322 - Discussion de la nature heuristique des solutions "Mémoire Active"

Nous savons que le problème fondamental en "Mémoire Active" est de reconstruire l'espace n dimensionnel (prise en compte de l'hypothèse de recombinaison). La difficulté majeure se situe au niveau du C.V.C. lorsque le système d'action S'i en sortie de ce centre comprend des variables qui ont leurs deux actions possibles. A ce moment il faut lever l'ambiguïté, afin qu'il ne reste finalement qu'une seule action possible par variable.

Il faudrait donc s'appuyer sur un critère qui donne satisfaction à coup sûr afin de ne conserver que les actions qui donnent le vecteur $\vec{\gamma}$ situé sur la trajectoire optimum optimorum. Malheureusement nous n'avons pas trouvé un critère qui donne de bons résultats à 100 %. Peut-être même n'en existe-t-il pas. Ce serait en quelque sorte la rançon d'avoir décomposé l'espace et fait une analyse parallèle dans des C.A.S. en fin de compte isolés au temps $\beta$.

Cette remarque semble d'ailleurs se justifier si l'on retourne aux sources : la neurophysiologie. Dans le cerveau en effet on ne peut absolument pas affirmer qu'il prend toujours les meilleures décisions. Construisant une machine qui simule cet organe, il ne faut pas s'étonner outre mesure que dans la dite machine s'introduisent les imperfections inhérentes au processus de fonctionnement du cerveau humain. Toujours est-il que ce domaine de recherche reste entièrement ouvert et que les progrès réalisables dans la voie d'une amélioration des structures "Mémoires Actives" passeront par la définition d'un bon "critère de lever d'ambiguïté" l'idéal étant naturellement de trouver un "critère parfait de lever d'ambiguïté. Dans ce cas évidemment la structure "Mémoire Active" serait une innovation révolutionnaire qui ferait date dans l'histoire des sciences.

Quoi qu'il en soit, en l'absence de critère parfait il fallait bien adopter une "cote mal taillée". La moins mauvaise de toute semblait être celle qui s'efforcerait de satisfaire en premier lieu le "système de préférence" de l'homme par interrogation des préaffichages de "hiérarchie interactions" et de "hiérarchie intervariables".

Cela signifie qu'en cas de doute pour éliminer une des deux actions de certaines variables du système S'i, on ne conserve que les actions qui satisfont les désirs de l'homme (au cas théoriquement où les solutions seraient égales quel que soit le couple d'actions retenues : dilemme d'Abélard). Or pratiquement, le fait d'avoir deux actions possibles cohérentes sur une variable n'indique pas forcément que quel que soit l'action retenue, on aboutisse à des trajectoires égales dans l'espace n dimensionnel. Si cette éventualité était vraie, cela signifierait que la machine est capable de construire ses solutions directement dans l'espace n dimensionnel et que par conséquent elle a résolu le problème de recombinaison, du fait qu'elle pourrait voir avec exactitude, dans l'hyperespace les répercussions d'une décision prise en cours d'élaboration de la trajectoire. En fait il n'en est rien, la machine travaillant dans les plans de projection, est partiellement aveugle au niveau de l'hyperespace lorsqu'il s'agit de prendre une décision pour réaliser une recombinaison cohérente... et c'est bien à ce niveau que se situe toute la difficulté !.. Il en résulte que suivant le couple d'actions retenues à partir du système S'i, on est conduit à des solutions de longueurs différentes.

L'affichage des hiérarchies permet de sélectionner le couple d'actions à retenir comme composante du vecteur $\vec{\gamma}$, il s'ensuit que des affichages hiérarchiques différents conduiront à des solutions différentes. Malgré tout il ne faut pas perdre de vue que la satisfaction du désir de l'homme est un élément important et qu'une solution satisfaisant ce désir peut être préférable à une solution théoriquement plus rapprochée de l'optimum mais qui néglige son système de préférence.

Par exemple en application ferroviaire le Service de l'Exploitation peut souhaiter qu'un train de messageries (RA) qui transporte des primeurs passe de préférence avant un train marchandises lourd (RO) même si la solution RA avant RO occasionne un temps de retards cumulés légèrement supérieur à la solution RO avant RA. Il faut noter que cette notion de hiérarchie intervariables et interactions se comporte comme une pseudo-priorité dans la mesure où on lève les ambiguïtés en se raccrochant aux préférences de l'homme.

Un problème épineux se pose, lorsque l'homme est indifférent à tout système de préférence. Dans ce cas on aimerait bien que la "Mémoire Active" donne la meilleure des solutions possibles. Cependant, dans la réalisation actuelle, nous sommes dans l'obligation d'afficher arbitrairement des hiérarchies si l'on veut que le dilemme d'Abélard soit résolu. Il en résulte que devant un affichage donné la machine donnera des résultats tributaires de celui-ci dans une certaine mesure. Dans l'optique de vouloir tirer le maximum des possibilités de la machine il faut donc jouer sur cet affichage (par permutation de fiches et CIRDJET) afin d'aboutir par essais successifs à des solutions de plus en plus rapprochées de l'optimum.

A ce stade deux idées d'amélioration de la structure "Mémoire Active" viennent à l'esprit :

1) automatiser le processus d'affichage successif des hiérarchies et priorités et retenir par comparaison, la meilleure des stratégies. Autrement dit, on réaliserait une "boîte d'or" qui permettrait à la machine d'améliorer ses solutions avec le temps. Ceci serait tout à fait en accord avec nos hypothèses sur la neurophysiologie et notamment celle relative à la faculté "d'apprentissage". En allant plus loin, on peut concevoir une "boîte d'or" suffisamment performante pour qu'elle retienne les données de la situation globale au moment où une ambiguïté a dû être levée, ainsi que le couple retenu pour aboutir à la meilleure des solutions données par la machine. Si par la suite, cette même situation globale se reproduit ou d'ailleurs une situation plus vaste mais contenant au minimum la situation précédemment mémorisée par la "boîte d'or", rien n'interdit d'appliquer directement le couple précédent en évitant ainsi les modifications d'affichage des hiérarchies et priorités. La machine aurait bien utilisé son expérience passée pour élaborer de nouvelles solutions, elle aurait donc appris et même dans le cas où la situation nouvelle est plus large que l'ancienne, elle aurait extrapolé ses facultés d'apprentissage, elle aurait généralisé (hypothèse H8 de généralisation) ;

2) définir une sorte de hiérarchie automatique permettant d'afficher sans équivoque la hiérarchie qui orienterait vers la meilleure des solutions possibles. La mise en application de cette idée revient en fait à déterminer un "bon critère de lever d'ambiguïté" voire même cet hypothétique "critère parfait de levet d'ambiguïté" qui conduirait à coup sûr à la solution optimum optimorum.

### 5.33 - *Comparaison des résultats "Mémoire Active" à ceux donnés par l'ordinateur (UNIVAC 1108)*

Cette comparaison a été faite pour 2, 3, 4, 5, 6, 7 et 8 variables.

5.331 - Notations

A) Repérage des exercices

Afin de particulariser les exercices traités de part et d'autre et d'éviter les confusions lors des comparaisons des résultats "Mémoire Active - Ordinateur", j'adopterai les notations suivantes :

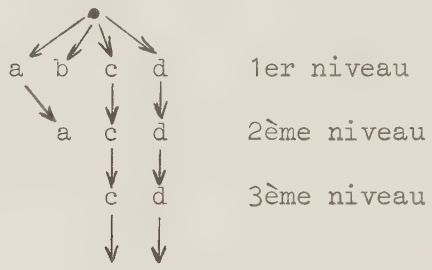
- tout exercice sera repéré par un code i j k formé de la manière suivante :

  i : nombre de variables ($1 < i < 8$)

  j : numéro de l'expérience, car pour i variables il était nécessaire de traiter plusieurs problèmes différents ($1 \leqslant j \leqslant 6$).

Pour simplifier les appellations nous distinguerons le nom (ij) d'une expérience de son numéro (j).

k : est formé de deux facteurs x et k




- x est un nombre pouvant varier de 1 à 3 chiffres (chaque chiffre correspondant à un niveau). Le 1er chiffre indique le numéro de la manipulation lorsqu'il y a hiérarchie intervariables ou interactions au 1er niveau et qu'on va effectuer des permutations d'affichage des hiérarchies. Par exemple :

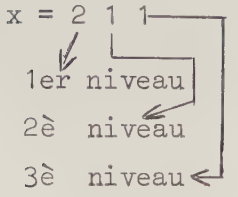
  a en tête → 1
  b " → 2
  c " → 3
  d " → 4

  Le deuxième chiffre indique le numéro de manipulation lorsque des variables ont fait l'objet d'un choix hiérarchique au deuxième niveau. Par exemple : si b est en tête au premier niveau, au deuxième niveau il est possible de faire

  a en tête → 1
  c " → 2
  d " → 3

  dans ce cas la manipulation avec b en tête au premier niveau et a en tête au deuxième niveau donnerait : x = 2 1
  1er niveau 2è niveau

De même le troisième chiffre indique le numéro de manipulation lorsqu'il y a hiérarchie au troisième niveau. Par exemple :




veut dire

b en tête au 1er niveau

a en tête au 2è niveau

c en tête au 3è niveau

- k' existe lorsque l'on a affiché un train prioritaire (avec la "Mémoire Active"). k' est égal à la lettre (identité de la variable) placée en tête dans l'ordre de succession que donne une solution. Le "k'" mémoire active correspond au "k'" ordinateur car c'est équivalent de donner une batterie de train à l'ordinateur en imposant un train en tête, ou d'afficher ce même train prioritaire avec la "Mémoire Active".

Exemple de formation du nom de manipulation :

si l'on énonce : manipulation 5413, cela signifie que l'on traite un problème à cinq variables, que l'on effectue l'expérience n° 4 et que l'on opère sur la manipulation n° 13. (1 signifiant qu'au 1er niveau c'est la lettre a et 3 signifiant qu'au 2ème niveau c'est la 3ème permutation que l'on vient d'effectuer).

B) Symboles

MA : mémoire active

O : ordinateur

i : nombre de variables

$N_P^{ijk}$ : module, ou nombre de pas d'une solution correspondant à la manipulation ijk

$N_m^{ij}$ : module ou nombre de pas de la solution minimum obtenue par la "Mémoire Active", correspondant à l'expérience ij

Mijk : manipulation ijk

Eij : expérience ij

$N_O^{ij}$ : module ou nombre de pas de la solution théorique optimum correspondant à l'expérience ij

$nb_O^{ij}$ : nombre d'essais (ou de manipulations) réalisés pour obtenir la solution théorique optimum par MA, correspondant à l'expérience ij

$nb_m^{ij}$ : nombre d'essais réalisés pour obtenir la solution minimum par M.A.

$m_{MA}^{ij}$ : module de la solution correspondant à l'espérance mathématique d'obtenir un résultat par M.A.

$R_m^{ij}\ \% = \dfrac{m_{MA}^{ij} - N_0^{ij}}{N_0^{ij}} \times 100$ : coefficient % d'éloignement de la solution correspondant à l'espérance mathématique d'obtenir un résultat par M.A. par rapport à la solution optimale $N_0^{ij}$ valable pour l'expérience ij ;

$\bar{R}_m^{\,i}\ \% = \dfrac{\sum_{j=1}^{6} R_m^{ij}\ \%}{6}$ : coefficient % moyen d'éloignement de la solution correspondant à l'espérance mathématique d'obtenir une solution par M.A. par rapport aux solutions optimales correspondant au nombre d'expériences faites sur le nombre de variable s i.

$T_{MA}^{ijk}$ : temps de calcul par "Mémoire Active" pour la manipulation ijk

$T_{MAE}^{ijk}$ : temps d'impression de la machine à écrire MAE pour la manipulation ijk

$T_0^{ij}$ : temps de calcul ordinateur pour l'expérience ij

$\mu_o^{ij}$ : module de la solution correspondant à l'e pérance mathématique d'obtenir un résultat par ordinateur pour l'expérience ij

$\Sigma_\mu^{ij}\ \% \dfrac{\mu_0^{ij} - N_0^{ij}}{N_0^{ij}} \times 100$ : coefficient % d'éloignement de la solution correspondant à l'espérance mathématique d'obtenir un résultat par ordinateur par rapport à la solution optimale $N_0^{ij}$ valable pour l'expérience ij ;

$\bar{\Sigma}_\mu^{\,i} \dfrac{\sum_{j=1}^{6} \Sigma_\mu^{ij}\ \%}{6}$ : coefficient % moyen d'éloignement de la solution correspondant à l'espérance mathématique d'obtenir un résultat par rapport aux solutions optimales correspondant au nombre d'expériences faites sur le nombre de variables i.

k : numéro de manipulation sur M.A.

k' : numéro de manipulation sur ordinateur

$N_0^{ijk'}$ : module minimum de la manipulation k'

$T_0^{ijk'}$ : temps calcul pour la manipulation k'

$\mu_0^{ijk'}$ : espérance mathématique pour la manipulation k'

$\Sigma_m^{ij}$ % : coefficient % d'éloignement de la solution correspondant à la solution minimum obtenue par M.A. par rapport à la solution optimum $N_0^{ij}$

$\bar{\Sigma}_m$ % : coefficient % moyen d'éloignement des solutions M.A. par rapport à l'optimum $N_0$

$\rho_0^{ij}$ : pouvoir optimisant de la M.A. pour l'expérience ij

$\bar{\rho}_0$ : pouvoir optimisant moyen de la M.A.

5.332 - Aspect théorique

A) Généralités

La mesure du pouvoir optimisant du combinateur s'effectue en lui faisant résoudre des problèmes de type combinatoire où il doit trouver la meilleure solution parmi le grand nombre de celles qui sont théoriquement possibles (factorielle i s'il y a i variables). Un problème ferroviaire que nous appellerons P1, particulièrement bien adapté à ce genre de comparaison est celui d'une batterie de i trains (i variables), ayant leur "marche" prédéterminée (c'est-à-dire que le graphique espace-temps caractérisant chaque train ne devra pas se déformer au cours du "routage") et devant circuler sur une voie unique unidirectionnelle (voir fig. 53a).

Les i trains sont placés sur un "canton réservoir" et doivent franchir six cantons pour atteindre le canton n° 7 qui est le "canton but".

Il s'agit de trouver l'ordre de départ idéal de ces i trains pour que le temps global d'occupation des voies entre A et B soit minimum. Il faut trouver l'arrangement (ou les arrangements) au sens mathématique permettant d'obtenir ce résultat, en faisant un choix judicieux parmi les (i !) possibilités.

Pour simplifier, on considère un intervalle d'un canton non occupé entre deux trains qui se suivent (voir fig. 53b). La pénétration sur le canton 3 par T2 pourra se faire à la limite, au moment de la transition d'état jaune-vert du signal S1.

B) Graphiques espaces-temps des trains considérés (voir fig. 53k).

5.333 - Analyse mathématique

A) Méthode

Etant donné que dans le problème posé à i variables il existe théoriquement i ! arrangements possibles, il est souhaitable de classer toutes ces solutions (qu'on obtient en ordinateur par un programme

de permutation) en fonction de leur module. Cela peut se représenter par la probabilité Pk d'avoir des solutions de module k (voir fig. 53d).

B) Rappel

* On appelle fonction de répartition F (x) la probabilité d'avoir une variable aléatoire X inférieure à x

$$F(x) = P(X < x)$$

$$\text{donc } F(x) = \sum_{xk < x} Pk$$

* On appelle densité de probabilité P (a), la dérivée de la fonction de répartition par rapport à x

$$\rho(x) = \frac{d\,F(x)}{d\,x} \quad \text{ce qui s'écrit aussi :}$$

$$\rho x\, dx = dF(x) = \rho\left[x < X < x + dx\right]$$

* On appelle espérance mathématique E { X } la valeur de la solution la plus probable. Cela signifie que si on fait un grand nombre d'expériences en moyenne, on doit retrouver l'espérance mathématique

$$E\{X\} = \int_{-\infty}^{+\infty} x\, dF(x) = \mu \quad \text{(voir fig. 53e)}$$

Dans le discret cela donne

$$\boxed{\mu = \sum_{k} x(k) P(k)} \quad \text{ce qui correspond à la moyenne}$$

5.334 - Définition du pouvoir optimisant $\mathcal{P}_0$

A) Pour juger de la validité des solutions fournies par le combinateur "Mémoire Active", j'ai considéré trois paramètres fondamentaux qu'il était possible de déterminer soit par ordinateur, soit par "Mémoire Active".

$\mu_0^{ij}$ : espérance mathématique théorique des solutions ou module moyen des solutions (module le plus probable si l'on faisait un tirage au sort parmi les i ! arrangements). Cette grandeur est calculée par ordinateur.

$N_0^{ij}$ : solution optimum déterminée par ordinateur

$m_{MA}^{ij}$ : espérance mathématique des différentes solutions données par la "Mémoire Active" pour l'expérience ij (en permutant l'affichage des hiérarchies, ou en imposant tour à tour les variables prioritaires, on a vu au paragraphe 5.322 que le module des solutions variait).

Compte tenu de ces informations il fallait trouver une relation simple entre elles et qui caractérise la qualité des solutions MA comparativement à $N_0^{ij}$ et à $\mu_0^{ij}$. Aussi j'ai décidé d'évaluer le pouvoir optimisant en construisant la formule suivante :

$$\mathcal{S}_0^{ij} = \frac{\mu_0^{ij} - m_{MA}^{ij}}{\mu_0^{ij} - N_0^{ij}}$$

B) Interprétation de cette relation

1) $m_{MA}^{ij} = N_0^{ij} \Rightarrow \mathcal{S}_0^{ij} = 1$ : la machine heuristique "Mémoire Active" est dite parfaitement optimisante (ce qui signifie qu'elle donne toujours la solution optimum (voir fig. 53f).

2) $N_0^{ij} < m_{MA}^{ij} < \mu_0^{ij} \Rightarrow 0 < \mathcal{S}_0^{ij} < 1$ : la machine est dite machine optimisante (fig. 53g).

3) $m_{MA}^{ij} = \mu_0^{ij} \Rightarrow \mathcal{S}_0^{ij} = 0$ : la machine sera dite machine de hasard. Cela signifie que pour résoudre un problème combinatoire donné on aurait la même probabilité d'avoir une solution de module μ en le traitant sur la "Mémoire Active" ou en recherchant la solution par tirage au sort (voir fig. 53h).

4) $m_{MA}^{ij} < \mu_0^{ij} \Rightarrow \mathcal{S}_0^{ij} < 0$ : la machine sera dite désoptimisante : ce qui veut dire que pour résoudre un problème combinatoire, on aurait intérêt à faire un tirage au sort, plutôt qu'à utiliser la machine (voir fig. 5.3j).

5) Cas particuliers :

* $\mu_0^{ij} = N_0^{ij}$ avec $m_{MA}^{ij} = N_0^{ij}$ . $\mathcal{S}_0$ étant algébriquement indéterminé, tendra vers 1. Cela signifie que toutes les solutions possibles sont égales et que la machine donne bien cette solution.

* $\mu_0^{ij} = N_0^{ij}$, avec $m_{MA}^{ij} \neq N_0^{ij} \Rightarrow \mathcal{S}_0 \to \pm \infty$. Un tel résultat indiquerait que la machine est en panne ou qu'il existe une erreur dans la formulation de l'exercice.

C) Remarques

Le pouvoir optimisant moyen pour i variables sera donné par la relation :

$$\mathcal{S}_0^{i} = \frac{\sum_{j=1}^{6} {}_0^{ij}}{6}$$

Sous une forme réduite le pouvoir optimisant moyen de la "Mémoire Active" sera donné par la formule :

$$\overline{\mathcal{P}}^{i}_{0} = \frac{\mu - m}{\mu - N_0}$$

5.335 - Définition de la fonction d'optimisation

J'appellerai "fonction d'optimisation" du combinateur "Mémoire Active" la courbe représentant les variations du pouvoir optimisant moyen $\overline{\mathcal{P}}^{i}_{0}$ en fonction du nombre de variables considérées dans les divers exercices. L'objet principal de la comparaison "Mémoire Active" - ordinateur est précisément de déterminer cette courte $\mathcal{P}0$ (i) dans la plage ($2 \leqslant i \leqslant 8$).

5.34 - *Formulation du problème P1 sur le combinateur*

5.341 - Choix des variables

La matrice des contraintes étant prévue pour six itinéraires, on ne peut considérer seulement que six variables de graphique "espace-temps" différents. Pour prendre en compte huit variables nous affecterons à deux itinéraires, deux variables (ces deux variables ayant la même pondération, afin qu'elles aient les mêmes contraintes avec les six autres). Pour éviter que ces deux variables se succèdent, on décide qu'elles seront espacées différemment selon que l'une passe avant l'autre ou l'autre avant l'une. Cela se traduit par la mise en place d'une contrainte dans les matrices de succession.

Afin d'obtenir six exercices différents pour chaque nombre i de variables, nous conviendrons de considérer les groupements donnés par le tableau 534a.

5.342 - Détermination des zones de contraintes

A) Objectif

Connaissant les marches des trains données par la fig. 53k il faut déterminer les contraintes à afficher dans les matrices afin de satisfaire aux conditions suivantes :

1) les trains respectent leur marche (aucune déformation du graphique espace-temps n'est autorisée ;
2) les trains respectent les règles de signalisation relatives à la succession. On considère l'hypothèse qui conserve en permanence un canton non occupé entre deux trains qui se suivent (fig. 53b).

B) Calcul des dimensions des contraintes

Etant donné qu'il s'agit d'un problème d'ordonnancement au départ, pour que les trains respectent leur marche une fois partis il suffit d'afficher une contrainte rectangulaire de côtés tels que les trains respectent toujours l'hypothèse de succession. Pour cela il est nécessaire de comparer les marches deux à deux et de déterminer les contraintes à afficher selon que a passe avant b ou b avant a (fig. 534b).

Exemple :

Si b part après a, pour que les graphiques ne se déforment pas et qu'il y ait un canton non occupé (A) entre a et b, le train b peut pénétrer sur le canton 2 lorsque le train a dégage le canton 3. Ceci correspond à un écart Na - Nb = 2 en temps élémentaires. Ou encore le train b peut partir deux temps élémentaires après le départ du train a. Si l'on réalise une contrainte en temps (ou pas), son côté correspondant à : a avant b, vaudra 2 (fig. 534c).

Si a part après b, c'est la fin du parcours de b qui conditionne le respect limite d'un canton non occupé (B). Cela va se traduire par une attente beaucoup plus grande au départ pour le train a. Le côté correspondant à b avant a vaudra Nb - Na = 9 - 1 = 8 (fig. 534c). Dans le C.A.S. la contrainte rectangulaire $C_{ab}$ devra être prise en compte. Cette contrainte étant affichée, le combinateur déterminera la meilleure stratégie (a avant b) ou (b avant a).

Ce que nous venons de déterminer représente la contrainte mesurée en "pas" au niveau du C.A.S. Or c'est la matrice des contraintes (graduée en cantons) qui constitue notre seul moyen d'accès.

Dans l'hypothèse (a avant b) la ligne de départ b correspond à un changement de canton pour a. Il est donc possible de contraindre sur a (fig. 534c) les cantons $a_2$ et $a_3$, car $a_2 = 1$ et $a_3 = 1$ dans la matrice de pondération des cantons. Cependant dans l'hypothèse (b avant a) la ligne de départ de a correspond au passage du pas 2 au pas 3 du train b sur le canton 5. Cette situation serait impossible à prendre en compte dans la matrice des contraintes qui ne peut considérer des contraintes de "fraction de canton". La méthode que j'ai mise au point consiste à subdiviser le canton 5 de b en deux segments 5' et 5" respectivement de 2 et 1 pas. Nous appellerons ces subdivisions des "cantons fictifs" ou "segments fictifs".

La mise en oeuvre d'une telle méthode a conduit à réaliser le tableau 534d dit "tableau de découpage en cantons fictifs".

La comparaison deux à deux de tous les trains suivant le principe de la fig. 534b permet d'établir la "matrice de dimensionnement des contraintes" (fig. 534e).

Enfin l'exploitation des deux ensembles d'information ci-dessus permet d'établir la "feuille de dialogue" du problème P1 que nous cherchons (fig. 534f).

*5.35 - Résultats*

Ils sont consignés dans le "tableau récapitulatif des résultats du problème P1" (fig. 534g) et illustrés par les graphiques (534h), (534i), (534j).

Afin de déterminer la meilleure méthode d'exploitation du combinateur nous avons effectué six séries de manipulations c'est-à-dire traité six fois consécutives le problème P1 en exploitant différemment la machine. Ces essais permettent d'établir les courbes repérées A, B, C, D, E, F, G, H et I qui ont les significations suivantes :

A : pouvoir optimisant $\mathcal{P}_0$ (i) en fonction du nombre des variables avec la solution minimum obtenue en agissant seulement sur la hiérarchie intervariables.

B : $\mathcal{P}_0$ (i) avec la solution minimum obtenue en agissant seulement sur les priorités.

C : $\mathcal{P}_0$ (i) avec la solution minimum obtenue en agissant seulement sur la hiérarchie interactions.

D : $\mathcal{P}_0$ (i) avec la solution minimum obtenue en agissant sur la hiérarchie intervariables et sur la priorité.

E : $\mathcal{P}_0$ (i) avec priorité et hiérarchie intervariables

F : $\mathcal{P}_0$ (i) avec hiérarchie interactions et hiérarchie intervariables

G : $\mathcal{P}_0$ (i) avec hiérarchie intervariables et hiérarchie interactions

H : $\mathcal{P}_0$ (i) avec priorité et hiérarchie interactions

I : $\mathcal{P}_0$ (i) avec hiérarchie interactions et priorités

*5.36 - Conclusions*

Les résultats précédents permettent de définir une bonne méthode d'exploitation du combinateur. Nous constatons que le meilleur pouvoir optimisant de 0,795 (courbe E de 534h) est obtenu en travaillant d'abord sur la priorité et ensuite sur la hiérarchie intervariables. Cependant cette méthode coûte cher en nombre d'essais (5,13). En conséquence nous retiendrons de préférence l'ordre : hiérarchie intervariables d'abord et priorité ensuite, qui donne (courbe D de 534h) un pouvoir optimisant de 0,77 avec un nombre moyen d'essais de 3,58.

Il est à noter toutefois que si le combinateur est dans un état hiérarchique donné et arbitraire et que l'on se propose de traiter le problème P 1 en ne faisant qu'un seul essai, le pouvoir optimisant moyen tombe à 0,48 avec $\varepsilon$ % = 9,4 (résultats calculés d'après le tableau 534g).

Il faut souligner aussi que l'examen des courbes de 534h ne permet pas de déceler une tendance de variation du pouvoir optimisant en fonction du nombre de variables. Autrement dit, la "fonction d'optimisation" de la Mémoire Active peut se représenter approximativement par une droite horizontale.

## 5.4 - AMELIORATION des PERFORMANCES par le "PRETRAITEMENT de la HIERARCHIE INTERVARIABLES"

### 5.41 - Position du problème

Les résultats précédents montrent que dans le meilleur des cas le pouvoir optimisant atteint 0,77. Devant un tel résultat, malgré tout assez modeste, il était logique de s'interroger sur la validité du critère de"lever d'ambiguïté" employé.

Les diverses manipulations effectuées faisaient ressortir notamment que le combinateur risquait de ne pas donner les solutions optima lorsqu'il subsistait deux actions possibles sur plusieurs variables en sortie du C.V.C. et que par conséquent il fallait interroger l'affichage des hiérarchies intervariables et interactions pour lever l'ambiguïté.

### 5.42 - Principe du "prétraitement hiérarchique"

#### 5.421 - Généralités

La modification que je propose vise à corriger l'organigramme fonctionnel du combinateur en employant un autre "critère de lever d'ambiguïté" basé en premier lieu, non pas sur la hiérarchie intervariables affichée par l'homme, mais essentiellement sur l'exploitation des résultats des progressions β dans les C.A.S. Ce nouveau critère consiste à agir en priorité sur la variable qui possède le plus petit nombre de pas β (Nβx selon les notations du paragraphe 4.543) avec toutes les autres.

#### 5.422 - Exemple avec le critère classique (interrogation de la hiérarchie intervariable)

Supposons que les résultats du parcours C.A.S. soient les suivants :

| | | X | Y | Z | MAX | MIN | MAX (MIN) | Actions autorisées |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| X | 1 | | 7 | 8 | 8 | 8 | 8 | X |
| | 0 | | 7 | 8 | 8 | | | X |
| Y | 1 | 6 | | 7 | 7 | 7 | | X |
| | 0 | 7 | | 7 | 7 | | | X |
| Z | 1 | 7 | 7 | | 7 | 7 | | X |
| | 0 | 8 | 7 | | 8 | | | X |

Si la hiérarchie intervariables est X, Y, Z et la hiérarchie interactions : (X = 1, Y = 1, Z = 1) selon le critère classique, on interrogerait en premier la variable classée première en hiérarchie intervariables c'est-à-dire X et on supprimerait son action 0. Si ce nouveau système est cohérent et s'il reste deux actions possibles sur X et Y, on agirait en second sur Y, et il se pourrait que le vecteur $\vec{\gamma 1}$ ait pour composantes : (X = 1, Y = 1, Z = 0).

5.423 - Exemple avec le prétraitement hiérarchique (critère du minimum de pas β)

Pour lever l'ambiguïté des deux actions possibles sur X, Y et Z de l'exemple précédent, au lieu d'interroger la hiérarchie intervariables, le nouveau critère consiste à agir en premier lieu sur la variable avant le Nβ minimum (c'est-à-dire Y ou Z qui ont sept pas mais pas X qui fait huit pas.

C'est seulement au deuxième stade, lorsqu'il y a égalité du nombre de pas β entre deux variables qui auraient leurs deux actions possibles après un essai de cohérence, qu'on interroge la hiérarchie intervariables (HIV). Dans l'exemple, si HIV est X, Y, Z entre Y et Z (qui ont sept pas), on choisit d'agir d'abord su Y (classé avant Z). Dans une deuxième étape on agirait sur Z et enfin en dernier sur X. Selon cette méthode l'ordre d'action sur les variables qui ont leurs deux actions possibles en sortie du C.V.C. est modifié. Cela pourrait conduire au pas $\vec{\gamma 2}$ (X = 0, Y = 1, Z = 1) différent de $\vec{\gamma 1}$. Or les composante de $\vec{\gamma 2}$ orientent le vecteur $\vec{\gamma}$ dans la direction de la trajectoire minimum, tandis que celle de $\vec{\gamma 1}$ l'oriente dans la direction d'une trajectoire qui satisfait le système de préférences de l'homme mais qui a le défaut de ne pas être optimum.

5.424 - Prise en compte du "critère du minimum" par le prétraitement hiérarchique

Pour que l'action sur les variables se fasse dans l'ordre des nombres de pas β croissant, il suffit d'être capable d'afficher manuellement un ordre hiérarchique correspondant à cet ordre donné. Par cette méthode on sera ainsi en mesure de vérifier directement sur la machine le critère moyennant quelques manipulations supplémentaires qui correspondent à la phase que j'appelle "prétraitement de la hiérarchie intervariables".

Pour déterminer l'ordre des variables, correspondant au nombre de pas β croissant, il suffit de comparer successivement les variables deux à deux dans leur C.A.S. et de les classer selon le nombre de pas β croissants.

Exemple :

D'après le tableau du paragraphe 5.422 si on étudiait séparément les résultats des trois C.A.S. on aurait :

* C.A.S. X Y : Nβ X1 = 7
Nβ X1 = 6
donc Nβ Y1 < Nβ X1

* C.A.S. X Z : Nβ X1 = 8
Nβ Z1 = 7
donc Nβ Z1 < Nβ Z1

* C.A.S. Y Z : Nβ Y1 = 7
Nβ Z1 = 7
donc Nβ Y1 = Nβ Z1

D'où le classement :

Nβ Y1 = Nβ Z1 < Nβ X1

Ce qui entraînerait les deux suites ci-après :

Y, Z, X (1) ou Z Y X (2)

Le choix entre (1) et (2) est fait à ce niveau seulement par interrogation de la hiérarchie.

Ainsi, on a pu déterminer un ordre d'interrogations des variables qui correspond bien à l'ordre des nombres de pas β croissants.

5.425 - Résultats (voir graphique 5435a et courbe J pour comparer avec les autres résultats sur graphique 534h)

Le problème P1 d'ordonnancement de trains au départ, entièrement retraité en appliquant cette méthode a donné des résultats très encourageants puisque le pouvoir optimisant moyen est passé de 0,7 à 0,95. Il est à noter que le nombre d'essais à effectuer en affichant tour à tour les priorités pour tenter d'améliorer les solutions est très réduit car il est possible d'appliquer à nouveau le critère du minimum de pas β pour sélectionner les variables prioritaires à afficher "en premier".

Le pouvoir optimisant de 0,95 a été obtenu en moyenne avec trois essais seulement et avec un éloignement % des solutions par rapport à l'optimum de 0,76 % (fig. 534i et 534j).

5.426 - Conclusions

Moyennant ce "prétraitement de la hiérarchie intervariables", il est possible d'évaluer l'effet d'un nouveau critère de lever d'ambiguïté sans réaliser les modifications de câblages que nécessiterait son application. Il est bien certain que cette méthode très intéressante, au niveau des manipulations de laboratoire, ne serait pas viable sur une machine opérationnelle et que dans cette optique il faudrait entreprendre la modification de circuits qui permettrait d'appréhender ce critère du "minimum de pas β". Cependant quelle que soit la méthode, la validité du critère reste intacte et l'automatisation de sa mise en oeuvre devrait conserver le pouvoir optimisant de 0,95 établi pour le problème P1.

## 5.5 - VERIFICATION du TEMPS de CALCUL THEORIQUE

### 5.51 - Généralités

Le but de cet exercice est de vérifier le temps de calcul maximum nécessaire à la machine pour trouver la solution du problème le plus long en "pas" qui puisse lui être posé et de vérifier que le temps expérimental concorde avec le temps théorique.

### 5.52 - Choix du problème

Il faut choisir un problème fortement combinatoire (par exemple de choix "au premier pas") mettant en jeu le nombre maximum de variables (8) et la pondération maximum des itinéraires (14 x 31). D'autre part, pour que la trajectoire soit la plus longue possible, il faut afficher des contraintes telles qu'une variable puisse passer sur le segment n° 2 seulement au moment où la variable précédente pénètre sur le segment 14.

### 5.53 - Calcul du temps maximal

D'après la formule établie au paragraphe 4.10, $t_{MA} = \frac{3}{2} C_n^2 \cdot L$ (ms). Comme les variables disparaissent les unes après les autres et à intervalles réguliers de 433 - (29 + 30) = 372 pas, le temps sera :

$$tm = \frac{3}{2} \left[401 \times C_8^2 + 372 \left(C_7^2 + C_6^2 \ldots + C_3^2 + C_2^2\right) + 404\right]$$

$$\boxed{tm = 48 \text{ s.}}$$

Nombre maximal de pas $\gamma$ pouvant être élaborés :

$N\gamma = 401 + 404 + 372 \times 6 = \underline{3\ 037 \text{ pas } \gamma}$

### 5.54 - Résultats expérimentaux

Le chronométrage du temps d'élaboration de la trajectoire sans impression de la machine à écrire donne 47 secondes et le module de la trajectoire est bien de 3 037 pas.

Cette expérience donne les limites supérieures de fonctionnement en temps et en pas du combinateur.

# CHAPITRE 6

## Problèmes d'ordonnancement réels traités sur la "Mémoire Active"

# 6.1 - LE PROBLEME FERROVIAIRE de GAGNY

## 6.11 - Configuration géographique - Segmentation des itinéraires

### 6.111 - Généralités

Le plan de voie 61 a donne la géographie du réseau à considérer. Afin d'utiliser au mieux les 14 cantons de la machine, nous avons adopté la segmentation des itinéraires représentée sur le plan par les conventions suivantes :

itinéraires d'origine Nord,

itinéraires d'origine Est,

itinéraires d'origine Sud.

La longueur des segments correspond à la distance de joint d'isolement à joint d'isolement au point de vue signalisation.

### 6.112 - Intégration de la longueur des trains

Un problème délicat se pose lorsque deux trains de longueur différente se succèdent sur le même itinéraire, car ces deux trains auront les mêmes contraintes "en cantons" avec tous les autres, mais des "contraintes en pas" différentes. De plus, il faut être capable de considérer le "temps de dégagement du signal".

La méthode que j'ai élaborée consiste à diviser tous les "joints fonctionnels" en deux éléments de joints indépendants (voir fig. 611 b1 et 611 b2). Le premier élément de joint (J T) est sensible au passage de la tête du train, tandis que le deuxième élément (J Q) déclenche une action au moment où la queue dégage (J T). La méthode consiste à déplacer ce joint de queue en avant par rapport au point de tête, d'une distance égale à la longueur L du train, de manière à ce que ce joint de queue soit sensibilisé lui aussi par le passage de la tête.

Tout se passe comme si la longueur du train transposée sur la voie (par le truchement de l'espacement des joints J T et J Q), de sorte que les signaux réagissent tous au passage de la tête. Dans cette optique, la queue n'a plus de rôle fonctionnel.

Sur le combinateur, il faudra considérer tous les segments 1, 21, 22, 31, 32, 41, 42, 5 et leur attribuer des poids différents selon la longueur et la vitesse des trains qui se succèderont sur le même itinéraire.

Pour les trains ponctuels, les segments 21, 31, 41 devraient théoriquement avoir des poids nuls. En réalité on doit afficher le poids minimum de 1.

6.113 - Déplacement fictif de signal

Si la longueur L du train est supérieure à l'espacement e entre signaux, on sera amené à déplacer fictivement le signal S 2 (fig.611 c1, 611 c2) afin de respecter le même ordre de succession dans la numérotation des segments et d'être ainsi capable de réaliser les contraintes en "cantons" correctes.

Le déplacement fictif n'a d'incidence que pour le joint de tête qui se trouve décalé de L - e. Cela se traduirait par un passage au rouge du signal S 1, retardé de $\frac{L - e}{v}$ secondes. Par contre la transition rouge - jaune se fera au bon moment lorsque le joint de queue sera sensibilité.

Cette méthode n'enfreint pas les conditions de sécurité, puisque les transitions d'état des signaux se feront toujours à l'instant voulu pour le train suivant.

## *6.12 - Graphe coloré de l'état des signaux*

6.121 - Matrice d'état des signaux

La segmentation des itinéraires étant réalisée, compte tenu des considérations précédentes, il faut déterminer la forme des contraintes. Or ces zones dépendent des relations entre itinéraires et son régies par le programme des enclenchements.

Il faut donc établir la "matrice d'état des signaux", compte tenu du tableau des enclenchements électriques réalisé sur le terrain ainsi que des règles particulières appliquées systématiquement par l'homme qui assure actuellement la gestion du "triangle de GAGNY"(1)

(1) Le but du problème dans une première phase est d'ordonnancer une situation réelle passée et de voir l'efficacité de la machine par rapport à l'habileté de l'homme (l'aiguilleur). Il est donc impératif de prendre les mêmes paramètres de base.

MATRICE d'ETAT des SIGNAUX

(pour un train j succédant à un train i)

(Voir fig. 611 d)

| | An | C1 | C2 |
|---|---|---|---|
| NE | SE | SE | SE |
| SN | EN | EN | EN |
| ES | NS | NS | NS |
| ZAP 1 : km 0 sauf NE | VL | VL | VL |
| ZAP 2 { NE 0,000 / SN 0,880 / ES 1,486 | VL | A | C |
| NE 2,145 + L<br>SN 3,043 + L<br>ES 3,273 + L | VL | A | S |
| NE 2,691 + L<br>SN 3,754 + L<br>ES 4,253 + L | VL | VL | A |
| NE 3,569 + L<br>SN 4,571 + L<br>ES 5,528 + L | VL | VL | VL |

Nota : L'emplacement de An, C1, C2 est donné par la fig. 611 d

Itinéraires extérieurs

| | An | | | C1 | | | C2 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| SE | NS | EN | NE | NS | EN | NE | NS | EN | NE |
| NS | EN | SE | ES | EN | SE | ES | EN | SE | ES |
| EN | SE | NS | SN | SE | NS | SN | SE | NS | SN |
| ZAP 1 : km 0 sauf NS | VL | VL | VL | A | VL | VL | C | VL | VL |
| ZAP 2 { ZAP 1/2 NS : km 0 / SE 0,880 / EN 1,486 | VL | A | VL | A | C | A | C | VL | C |
| NS 1,712 + L<br>SE 2,571 + L<br>EN 2,824 + L | VL | A | VL | VL | C | A | VL | VL | C |
| NS 2?201 + L<br>SE 3,017 + L<br>EN 3,254 + L | VL | VL | VL | VL | VL | A | VL | VL | S |
| NS 3,181 + L<br>SE 3,563 + L<br>EN 3,965 + L | VL | VL | VL | VL | VL | VL | VL | VL | A |
| NS 4,456 + L<br>SE 4,441 + L<br>EN 4,782 + L | VL | VL | VL | VL | VL | VL | VL | VL | VL |

Itinéraires intérieurs

6.122 - Graphe coloré

Il est nécessaire d'établir un graphe représentant toutes les confrontations d'itinéraires deux à deux, afin de montrer les incompatibilités de situations qui en résultent.

En premier lieu, il faut établir le tableau des conflits (fig. 612 a). Pour mettre en évidence les états des signaux compte tenu de la position des trains, j'utiliserai le principe graphique illustré par la fig. 612 b.

Il se lit de la manière suivante :

- états successifs des signaux de l'itinéraire II lorsqu'un train circule sur l'itinéraire I. Dans la matrice des contraintes du combinateur, cette situation correspondra à I avant II ;
- lorsque T I est entièrement sur le canton 4, le joint J I commande l'état vert pour le signal s 1 (vecteur $\vec{V}v$), l'état jaune pour le signal s 2 (vecteur $\vec{V}j$), l'état rouge pour le signal s 3 (vecteur $\vec{V}r$) ;
- en respectant l'hypothèse de "circulation avec la présence de l'état vert" pour le premier signal qui précède la tête du train, il est possible qu'un train T 1 soit sur le canton 4 de l'itinéraire I et qu'un autre train T 2 soit sur le canton I de l'itinéraire II.

*Remarques :*

Nous associons sans cesse le segment et le signal d'extrémité de ce segment (fig. 612 b1). La situation simultanée de deux trains se représente toujours par l'un des deux schémas de la fig. 612 b2. L'examen complet des conflits entre tous les itinéraires a conduit à établir le graphe coloré de l'état des signaux 612 $c_1$ et 612 $c_2$.

## 6.13 - Données du trafic

Nous considérerons un problème réel qui correspond à un trafic qui a eu lieu à GAGNY. Ce problème sera dit : "l'heure de pointe à 17 trains".

Enoncé :

| Nom du train | Type | Longueur m | Poids tonnes | Itinéraire | Vitesse km/h | Priorité | Heure théorique d'arrivée au carré C1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| BV 2 131 | RO | 600 | 1 100 | NE | 70 | 1 | 6 h 52' 8" |
| SB 4 208 | RO | 600 | 1 100 | SN | 70 | 1 | 7 h 6" 18" |
| SZ 3 543 | RO | 600 | 1 000 | NS | 70 | 1 | 7 h 2' 8" |
| 72 271 | RO | 600 | 1 000 | NS | 70 | 1 | 7 h 5' 8" |
| 9 381 | RA | 400 | 2 208 | NS | 80 | 1 | 7 h 9' 14" |
| X 2 439 | HP | 20 | 50 | NS | 70 | 1 | 7 h 15' 8" |
| X 9 783 | HP | 20 | 50 | ES | 70 | 1 | 7 h 13' 25" |
| 43 170 | RA | 600 | 1 000 | SE | 80 | 1 | 7 h 21' 38" |
| 44 108 | RA | 400 | 4 20 | SE | 80 | 1 | 7 h 26' 38" |
| X 9 790 | HP | 20 | 50 | EN | 70 | 1 | 7 h 17' 25" |
| ZA 5 318 | RO | 600 | 1 200 | SN | 70 | 1 | 7 h 33' 18" |
| 42 691 | RA | 400 | 1 000 | NS | 80 | 1 | 7 h 30' 14" |
| X 9 788 | HP | 20 | 50 | EN | 70 | 1 | 7 h 21' 25" |
| SA 4 334 | RO | 600 | 1 100 | SN | 70 | 1 | 7 h 46' 18" |
| TV 4 154 | RO | 600 | 1 000 | SE | 70 | 1 | 7 h 51' 18" |
| AZ 3 511 | RO | 600 | 1 700 | NS | 70 | 1 | 7 h 38' 8" |
| YO | VY | 600 | 1 000 | ES | 80 | 1 | 7 h 40' 44" |

## 6.14 - Calcul du temps élémentaire de base

Cette grandeur correspond à l'intervalle de temps réel simulé par un pas $\gamma$ du combinateur.

La segmentation des itinéraires fait apparaître que les cantons les plus longs mesurent 1 355 m et les données du trafic indiquent que la vitesse minimum théorique des trains sur ces cantons est de 60 km/h.

Pour ce canton qui est le plus péjorant en temps, on peut au maximum lui affecter un poids de 31, d'où :

$$t_b = \frac{1\,355}{16{,}66 \times 31}$$

$$\boxed{t_b = 2{,}622 \text{ secondes}}$$

Notons que le temps "Mémoire Active", pour définir un pas, (avec huit variables utilisées simultanément) est au maximum égal à 42 ms, ce qui donne un rapport temporel minimum de simulation :

$$\boxed{\rho = \frac{2{,}6}{42 \times 10^{-3}} = 62}$$

## 6.15 - Détermination de la pondération des itinéraires

Compte tenu des données du trafic, de la segmentation des itinéraires et du plan de voie qui indique les vitesses de ralentissement, il est possible d'établir la marche théorique de chaque train et par conséquent de calculer le poids à affecter à chaque canton de chaque itinéraire. Cette étude conduit à établir les "feuilles itinéraires" suivantes :

(voir pages suivantes)

ITINERAIRE : 1 (N. E.)

| Points singuliers O : itinéraires X : espacement | n° de canton utilisé | Longueur (mouvement ponctuel) | Marche 1 | | | | Marche 2 | | | | Marche 3 70 km/h 600 m | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Longueur | Vitesse - Temps | Poids exact | Pondération | Longueur | Vitesse - Temps | Poids exact | Pondération | Longueur | Vitesse - Temps | Poids exact | Pondération |
| 1 S | 1 | 936 | | | | | | | | | 936 | 70<br>48 | 18, 3 | 18 |
| 2 S | 2 | 1120 | | | | | | | | | 1120 | 70<br>58 | 22 | 22 |
| 3 ZAP | 3 | 1121 | | | | | | | | | 1121 | 70<br>58 | 22 | 22 |
| 4 An | 4 | 210 | | | | | | | | | 210 | 70<br>10, 8 | 4, 1 | 4 |
| 5 C1 | 5 | 1034 | | | | | | | | | 1034 | 70<br>53 | 20 | 20 |
| 6 | 6 | 455 | | | | | | | | | 1055 | 70, 384<br>20<br>40/671<br>60 | 30, 5 | 30 |
| O 7 C2 | 7 | 335 | | | | | | | | | 20 | 40<br>1, 8 | 0, 38 | 1 |
| 8 | 8 | 0 | | | | | | | | | 315 | 40<br>28, 5 | 10, 8 | 11 |
| X 9 | 9 | 111 | | | | | | | | | 111 | 40<br>10 | 3, 8 | 4 |
| O 10 S | 10 | 546 | | | | | | | | | 20 | 40<br>1, 8 | 0. 69 | 1 |
| 11 | 11 | 0 | | | | | | | | | 526 | 40<br>50 | 19 | 19 |
| X 12 S | 12 | 878 | | | | | | | | | 278 | 40<br>25 | 9, 5 | 9 |
| 13 | 13 | 0 | | | | | | | | | 600 | 40<br>54 | 20, 5 | 21 |
| X 14 | 14 | 908 | | | | | | | | | 308 | 40/140<br>12, 6<br>70 168<br>8, 6 | 8 | 8 |
| | | | | | | | | | | | | | 189, 57 | 190 |

ITINERAIRE : 2 (N.S.)

| points singuliers O : itinéraires X : espacement | n° de canton utilisé | Longueur (mouvement ponctuel) | Marche 1 — 70 km/h — 20 m | | | | Marche 2 — 80 km/h — 400 m | | | | Marche 3 — 70 km/h — 600 m | | | | C |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Longueur | Vitesse - Temps | Poids exact | Pondération | Longueur | Vitesse - Temps | Poids exact | Pondération | Longueur | Vitesse - Temps | Poids exact | Pondération | |
| 1 S | 1 | 936 | 936 | | | 18 | 936 | 80 42 | 16 | 16 | 936 | 70 48 | 18,3 | 18 | |
| 2 S | 2 | 1120 | 1120 | | | 22 | 1120 | 80 50,5 | 18,8 | 19 | 1120 | 70 58 | 22 | 22 | |
| 3 ZAP | 3 | 1121 | 1121 | | | 22 | 1121 | 80 50,5 | 18,8 | 19 | 1121 | 70 58 | 22 | 22 | |
| 4 An | 4 | 210 | 210 | | | 4 | 210 | 80 9,5 | 3,6 | 4 | 210 | 70 10,8 | 4,1 | 4 | |
| 5 C1 | 5 | 1034 | 1034 | | | 20 | 1034 | 80 46,5 | 17,9 | 18 | 1034 | 70 53 | 20 | 20 | |
| 6 | 6 | 468 | 488 | | | 9 | 868 | 80 39 | 14,9 | 15 | 1068 | 70 55 | 21 | 21 | |
| O 7 C2 | 7 | 290 | 270 | | | 5 | 20 | 86 1 | 0,69 | 1 | 20 | 70 1 | 0,69 | 1 | |
| 8 | 8 | 0 | 20 | | | 1 | 270 | 80 12,3 | 4,7 | 5 | 270 | 70 13,9 | 5,3 | 5 | |
| X 9 | 9 | 169 | 169 | | | 3 | 169 | 80 7,6 | 2,9 | 3 | 169 | 70 8,7 | 3,3 | 3 | |
| O 10 S | 10 | 980 | 960 | | | 19 | 580 | 80 26 | 10 | 10 | 380 | 70 19,5 | 7,4 | 7 | |
| 11 | 11 | 0 | 20 | | | 1 | 400 | 80 18 | 6,9 | 7 | 600 | 70 31 | 11,8 | 12 | |
| X 12 S | 12 | 1275 | 1255 | | | 24 | 875 | 80 39,5 | 15 | 15 | 675 | 70 34,5 | 13,1 | 13 | |
| 13 | 13 | 0 | 20 | | | 1 | 400 | 80 18 | 6,9 | 7 | 600 | 70 31 | 11,8 | 12 | |
| X 14 | 14 | 1082 | 1082 | | | 21 | 702 | 80 31,5 | 12 | 12 | 502 | 70 26 | 10 | 10 | |
| | | | | | | 170 | | | 148,49 | 151 | | | 170,79 | 17 | |

ITINERAIRE : 3 (S.E.)

| points singuliers O : itinéraires X : espacement | n° de canton utilisé | Longueur (mouvement ponctuel) | Longueur | Marche 1 — 70 km/h — 600 m: Vitesse - Temps | Poids exact | Pondération | Longueur | Marche 2 — 80 km/h — 400 m: Vitesse - Temps | Poids exact | Pondération | Longueur | Marche 3 — 80 km/h — 600 m: Vitesse - Temps | Poids exact | Pondération | C |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1<br>S | 1 | 1027 | 1027 | 70<br>53 | 20 | 20 | 1027 | 80<br>46,4 | 17,6 | 18 | 1027 | 80<br>46 | 17.5 | 17 | |
| 2<br>S | 2 | 1170 | 1170 | 70<br>60 | 22,8 | 23 | 1170 | 80<br>52,5 | 20 | 20 | 1170 | 80<br>52,4 | 20 | 20 | |
| 3<br>ZAP1 | 3 | 900 | 900 | 70<br>46,3 | 17,6 | 18 | 900 | 80<br>40,5 | 15,4 | 15 | 900 | 80<br>40,5 | 15,4 | 16 | |
| 4<br>An<br>ZAP2 | 4 | 880 | 880 | 70<br>45 | 17,1 | 17 | 880 | 80<br>39,5 | 15 | 15 | 880 | 80<br>39,5 | 15 | 15 | |
| 5<br>C1 | 5 | 1165 | 1165 | 70<br>60 | 22,8 | 25 | 1165 | 80<br>52,5 | 20 | 20 | 1165 | 80<br>52,5 | 20 | 20 | |
| 6 | 6 | 526 | 1126 | 70/409<br>21<br>40/717<br>65 | 33 | 31 | 926 | 80/409<br>18,2<br>40/517<br>47 | 25 | 25 | 1126 | 80/409<br>18,2<br>40/717<br>65 | 31,5 | 31 | |
| O<br>7<br>C2 | 7 | 338 | 20 | 40<br>1,8 | 0,38 | 1 | 20 | 40<br>1,8 | 0,38 | 1 | 20 | 40<br>1,8 | 0,38 | 1 | |
| 8 | 8 | 0 | 318 | 40<br>28,5 | 10,8 | 11 | 318 | 40<br>28,5 | 10,8 | 11 | 318 | 40<br>28,5 | 10,8 | 11 | |
| X<br>9 | 9 | 108 | 108 | 40<br>9,7 | 3,7 | 4 | 108 | 40<br>9,7 | 3,7 | 4 | 108 | 40<br>9,7 | 3,7 | 4 | |
| O<br>10<br>S | 10 | 546 | 20 | 40<br>1,8 | 0,69 | 1 | 146 | 40<br>13 | 5 | 5 | 20 | 40<br>1,8 | 0,69 | 1 | |
| 11 | 11 | 0 | 526 | 40<br>47,4 | 18,1 | 18 | 400 | 40<br>36 | 13,9 | 14 | 526 | 40<br>47,4 | 18,1 | 18 | |
| X<br>12<br>S | 12 | 878 | 278 | 40<br>25 | 9,5 | 9 | 478 | 40<br>43 | 16,4 | 16 | 278 | 40<br>25 | 9,5 | 9 | |
| 13 | 13 | 0 | 600 | 40<br>54 | 20,5 | 20 | 400 | 40<br>36 | 13,8 | 14 | 600 | 40<br>54 | 20,5 | 21 | |
| X<br>14 | 14 | 908 | 308 | 40/140<br>12,6<br>70/168<br>8,6 | 8 | 8 | 508 | 40/140<br>12,6<br>80/368<br>16,5 | 11,2 | 11 | 308 | 40/140<br>12,6<br>80/168<br>7,5 | 7,7 | 8 | |
| | | | | | 204,97 | 206 | | | 188,18 | 189 | | | 192,47 | 193 | |

ITINERAIRE : (... N.)

| Points singuliers O : itinéraires X : espacement | n° de canton utilisé | Longueur (mouvement ponctuel) | Marche 1 | | | | Marche 2 | | | | Marche 3 (80 km/h — 600 m) | | | | C |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Longueur | Vitesse - Temps | Poids exact | Pondération | Longueur | Vitesse - Temps | Poids exact | Pondération | Longueur | Vitesse - Temps | Poids exact | Pondération | |
| 1<br>S | 1 | 1027 | | | | | | | | | 1027 | 70<br>53 | 20,2 | 22 | |
| 2<br>S | 2 | 1170 | | | | | | | | | 1170 | 70<br>62 | [illegible] | 23 | |
| 3<br>ZAP1 | 3 | 900 | | | | | | | | | [illegible] | 70<br>46,3 | 17,7 | 18 | |
| 4<br>A<br>ZAP2 | 4 | 880 | | | | | | | | | 880 | 70<br>45 | 17 | 17 | |
| 5<br>C1 | 5 | 1165 | | | | | | | | | 1165 | 70<br>60 | 23 | 23 | |
| 6 | 6 | 509 | | | | | | | | | 1109 | 70<br>57 | 21,7 | 22 | |
| O<br>7<br>C2 | 7 | 356 | | | | | | | | | 20 | 70<br>1 | 0,38 | 1 | |
| 8 | 8 | 0 | | | | | | | | | 336 | 70<br>17,3 | 6,6 | 6 | |
| X<br>9 | 9 | 133 | | | | | | | | | 133 | 70<br>6,8 | 2,6 | 3 | |
| O<br>10<br>S | 10 | 711 | | | | | | | | | 111 | 70<br>5,7 | 2,- | 2 | |
| 11 | 11 | 0 | | | | | | | | | 600 | 70<br>31 | 11,[illegible] | 12 | |
| X<br>12<br>S | 12 | 817 | | | | | | | | | 227 | 70<br>11,5 | 4,4 | 4 | |
| 13 | 13 | 0 | | | | | | | | | 600 | 70<br>31 | 11,8 | 12 | |
| X<br>14 | 14 | 853 | | | | | | | | | 253 | 70<br>13 | 5 | 5 | |
| | | | | | | | | | | | | | 167,38 | 168 | |

ITINÉRAIRES (E.N.)

| Points singuliers O : itinéraires X : espacement | n° de canton utilisé | Longueur (mouvement ponctuel) | Marche 1 (70 km/h — 20 m) | | | | Marche 2 | | | | Marche 3 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Longueur | Vitesse - Temps | Poids exact | Pondération | Longueur | Vitesse - Temps | Poids exact | Pondération | Longueur | Vitesse - Temps | Poids exact | Pondération |
| 1 ZAP1 | 1 | 1305 | 1305 | | | 25 | | | | | | | | |
| 2 An | 2 | 1355 | 1355 | | | 27 | | | | | | | | |
| 3 ZAP2 | 3 | 113 | 113 | | | 3 | | | | | | | | |
| 4 C1 | 4 | 997 | 997 | | | 29 | | | | | | | | |
| 5 X | 5 | 0 | 20 | | | 1 | | | | | | | | |
| 6 O | 6 | 351 | 351 | | | 12 | | | | | | | | |
| 7 C2 | 7 | 300 | 280 | | | 6 | | | | | | | | |
| 8 X | 8 | 0 | 20 | | | 1 | | | | | | | | |
| 9 O | 9 | 130 | 130 | | | 3 | | | | | | | | |
| 10 S | 10 | 711 | 691 | | | 15 | | | | | | | | |
| 11 X | 11 | 0 | 20 | | | 1 | | | | | | | | |
| 12 N | 12 | 817 | 797 | | | 16 | | | | | | | | |
| 13 S | 13 | 0 | 20 | | | 1 | | | | | | | | |
| 14 | 14 | 853 | 833 | | | 16 | | | | | | | | |
| | | | | | | 154 | | | | | | | | |

ITINERAIRE : 6 (E.S.)

| Points singuliers O : itinéraires X : espacement | n° de canton utilisé | Longueur (mouvement ponctuel) | Marche 1 — 70 km/h — 20 m | | | | Marche 2 | | | | Marche 3 — 80 km/h — 600 m | | | | Obs |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Longueur | Vitesse - Temps | Poids exact | Pondération | Longueur | Vitesse - Temps | Poids exact | Pondération | Longueur | Vitesse - Temps | Poids exact | Pondération | |
| 1 ZAP1 | 1 | 1305 | 1305 | | | 25 | | | | | 1305 | 80 67 | 25,5 | 25 | |
| 2 An | 2 | 1355 | 1355 | | | 27 | | | | | 1355 | 80 61 | 23,2 | 23 | |
| 3 ZAP2 | 3 | 113 | 113 | | | 3 | | | | | 113 | 80 5,1 | 2,3 | 2 | |
| 4 C1 | 4 | 997 | 997 | | | 29 | | | | | 997 | 80/450 20,1 40/537 48 | 26 | 26 | |
| 5 | 5 | 0 | 20 | | | 1 | | | | | 600 | 40/305 27,5 60/295 17,7 | 17 | 17 | |
| X 6 | 6 | 306 | 306 | | | 10 | | | | | 306 | 60/125 7,5 80/181 8,2 | 6 | 6 | |
| O ; C2 | 7 | 380 | 360 | | | 9 | | | | | 20 | 80 1 | 938 | 1 | |
| 8 | 8 | 0 | 20 | | | 1 | | | | | 380 | 80 17 | 6,5 | 7 | |
| X 9 | 9 | 114 | 114 | | | 2 | | | | | 114 | 80 5,1 | 1,94 | 2 | |
| O 10 S | 10 | 980 | 960 | | | 19 | | | | | 360 | 80 16,1 | 6,3 | 6 | |
| 11 | 11 | 0 | 20 | | | 1 | | | | | 600 | 80 27 | 10,3 | 10 | |
| X 12 S | 12 | 1275 | 1255 | | | 24 | | | | | 655 | 80 29,5 | 11,2 | 11 | |
| 13 | 13 | 0 | 20 | | | 1 | | | | | 600 | 80 27 | 10,3 | 10 | |
| X 14 | 14 | 1102 | 1082 | | | 21 | | | | | 482 | 80 21,6 | 8,3 | 8 | |
| | | | | | | 173 | | | | | | 153,8 | 154 | | |

## 6.15 bis - Construction de la feuille de dialogue

### Détermination des zones de contraintes

Elle se fait par l'exploitation du graphe coloré de l'état des signaux.

Considérons les itinéraires III et II. On raisonne de la façon suivante :

- si le train de l'itinéraire III passe avant le train de l'itinéraire II, on peut construire le côté C I de la contrainte (voir fig. 615 a). Sur le graphe, on lit que les situations (III 4, II 5), (III 5, II 5), (III 6, II 6) sont incompatibles. Il faut donc interdire ces cases ;
- si le train de l'itinéraire II passe avant le train de l'itinéraire III, c'est le côté C 2 de la contrainte qui sera déterminé. Par lecture du graphique 612 c1 on est amené à interdire (III 4, II 5), (III 4, II 6), (III 4, II 7), d'où la zone de contrainte hachurée (fig. 615 a).

Avec cette méthode répétée, pour toutes les matrices, on établit la "feuille de dialogue" 615 b.

## 6.16 - Etablissement du "synoptique d'affectation des trains" (voir fig. 616 a)

L'heure d'arrivée des trains aux points de prise en compte étant aléatoire, il faut être capable de fournir les informations correspondant à un nouveau train à n'importe quel moment de l'évolution du problème sur machine. Deux politiques peuvent être mises en oeuvre selon l'objectif recherché.

### I) Fonctionnement opérationnel

Les trains signalent automatiquement au combinateur leurs caractéristiques par l'intermédiaire de capteurs d'informations placés sur la voie. L'arrivée d'un nouveau train doit provoquer momentanément l'arrêt du traitement, la mise sur réseau d'une nouvelle variable et le relancement du traitement avec des données supplémentaires. Notons que ce mode de travail nécessite un organe de gestion des "entrées-sorties" du combinateur, défini au chapitre VII.

### II) Simulation après coup d'une situation réelle

L'objectif essentiellement expérimental est de juger de la valeur de la stratégie qu'aurait engagée la "Mémoire Active" devant un problème concret par comparaison avec d'autres stratégies élaborées par des méthodes différentes et aussi avec la stratégie réelle qui a eu lieu sur le terrain.

Dans ce mode opératoire, l'heure de présentation des trains en un point de référence est connue. Il s'agit "d'injecter" ces trains sur le système à leur date de passage aux points de prise en compte (points limites de la configuration examinée).

La méthode consiste à travailler en "Routage limité". Le nombre de pas de routage existant entre les "injections" de deux trains représente l'intervalle de temps séparant leurs dates de présentation aux points de prise en compte (en effet nous avons vu que dans le problème de GAGNY un pas $\gamma$ représentait 2,62 s). Il faut alors établir un diagramme que j'appelle "synoptique de mise sur réseau" (fig. 616 a) qui indique, en fonction du nombre de pas $\gamma$, la date (en pas) de "mise sur réseau" des trains ainsi que leur identité et caractéristiques.

*Remarques :*

Avec l'exemple du problème de GAGNY, nous avons pu mettre sur pied une méthode générale de formulation d'un problème ferroviaire en vue de son traitement par un combinateur "Mémoire Active".

Cette méthodologie résumée sur le tableau 616 b implique la construction d'un certain nombre de documents intermédiaires (plan de segmentation, feuille itinéraire, graphe coloré) qui permettent d'établir la "feuille de dialogue", document de base pour l'affichage d'un problème.

## *6.17 - Résultats*

### 6.171 - Discussion sur la qualité d'une fluidification

De par son principe, la "Mémoire Active" est susceptible de retarder une variable sur n'importe quel point de la configuration qu'elle examine, autrement dit, elle fluidifie de façon globale.

Notons cependant que la fluidification est d'autant meilleure que la configuration est plus étendue. La qualité d'une stratégie est étroitement dépendante des limites géographiques et temporelles des situations "origine". En effet une stratégie $S_n$ optimale avec n variables ne l'est plus avec n + 1.

Or la stratégie résultante sera d'autant meilleure que l'information correspondant à la n + 1e variable sera connue plus tôt. Autrement dit, il faut réévaluer le plus tôt possible la stratégie $S_n$ pour engager $S_n + 1$. En circulation ferroviaire, cela signifie que l'on a intérêt à connaître la présence des trains le plus loin possible de la zone de conflit. Par conséquent il faut trouver un compromis économique entre le volume technologique du combinateur (fonction de l'étendue de prise en compte) et la qualité des stratégies.

6.172 - Evaluation des retards

La valeur d'une stratégie ferroviaire en régime perturbé peut se chiffrer en additionnant les temps de retard accusés par chacun des trains. La meilleure stratégie, selon ce critère, serait celle qui donne le temps de retards cumulés minimum.

Ceci est valable dans le cas où les temps de retard pour les différents trains ont le même poids (hypothèse d'une fluidification à temps minimum). Si les retards ont des poids économiques différents (hypothèse d'une fluidification à coût minimum) la meilleure stratégie est celle qui revient économiquement la moins chère.

Nous savons que la "Mémoire Active" est basée sur un principe temporel, mais qu'une correction (par le jeu des priorités) permettrait d'intégrer les coûts. Cependant des études restent à faire pour établir un tableau de corrélation entre le poids économique des retards et les niveaux de priorité à afficher. Aussi les résultats que nous donnerons correspondront à ceux de l'hypothèse de fluidification temporelle.

Le calcul des "retards cumulés" se fait par différence entre le temps d'occupation de l'itinéraire de chaque train, donné par le listing "Mémoire Active" et le temps d'occupation théorique (s'il n'y avait pas de gêne) affiché (en poids) sur la matrice de pondération.

Il faut souligner que la machine donne les temps de retard que doivent accuser les trains, ainsi que l'endroit géographique où ils ont lieu, afin que la fluidification se réalise au mieux.

Le moyen physique (ralentissement, arrêt) qui permet au train de réaliser effectivement ce retard, n'intervient pas. Le retard indiqué par la "Mémoire Active" est global et recouvre à la fois le temps perdu en décélération, en arrêt (s'il y a lieu), et en accélération.

6.173 - Résultats du problème réel à 17 trains

Avec l'hypothèse du respect de deux cantons non occupés entre deux trains qui se suivent et d'une valeur économique identique pour tous les trains, la machine donne 6'30" de retards cumulés portant sur 8 trains et qui se répartissent comme suit :

| N° trains | 72271 | 9381 (RA) | X 2439 | X 9790 | X 9788 | 43170 (RA) | 44108 (RA) | YO |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Temps de retard | 53" | 18" | 76" | 47" | 13" | 89" | 45" | 45" |

Si on s'efforce maintenant de fluidifier en se rapprochant d'un critère économique qui consisterait à ne pas retarder les trains du régime accéléré (RA) (en les affichant prioritaires), on obtient 16' 30" de retards cumulés qui se répartissent comme suit :

| N° trains | 72271 | 9381 (RA) | X 2439 | X 9790 | X 9788 | ZA 5318 | YO |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Temps de retard | 53" | 18" | 76" | 47" | 650" | 97" | 45" |

Ce deuxième critère est assez voisin de la réalité et correspond à celui employé par l'homme (l'aiguilleur) qui a géré la situation réelle à GAGNY. Notons que l'ordonnancement réel a coûté environ 25 mn de retards cumulés, ce qui permet de vérifier l'ordre de grandeur des résultats de la fluidification "Mémoire Active".

Il faut souligner cependant qu'il existe de légères dérives en ce qui concerne les bases de comparaison. Sur le combinateur on a supposé :

- que les trains avaient respecté leur vitesse théorique ;
- qu'ils s'étaient effectivement présentés à l'heure théorique au point de prise en compte.

En réalité l'aiguilleur a tenu compte de ces dérives, alors que la "Mémoire Active" les a ignorées.

6.174 - Batterie de problèmes fictifs à 28 trains

Dans le but d'établir des comparaisons avec d'autres méthodes expérimentales à l'étude (méthode BRANCH and BOUND IBM, simulateur analogique C.S.E.E.), et pour un nombre raisonnable d'exercices, dix problèmes fictifs correspondant aux passages de 28 trains par heure sur le triangle ont été construits.

Afin de considérer les mêmes paramètres de base, nous avons pris l'hypothèse du respect d'un canton non occupé entre deux circulations. De plus nous avons traité les exercices avec différentes distances de visibilité des signaux ramenées en temps et appelées (KI).

Les résultats suivants ont été obtenus :

| N° de l'exercice | $S^{28}_1$ | | $S^{28}_2$ | | $S^{28}_3$ | | $S^{28}_4$ | | $S^{28}_5$ | | $S^{28}_6$ | | $S^{28}_7$ | | $S^{28}_8$ | | $S^{28}_9$ | | $S^{28}_{10}$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| KI | 10" | 60" | 10" | 60" | 10" | 60" | 10" | 60" | 10" | 60" | 10" | 60" | 10" | 60" | 10" | 60" | 10" | 60" | 10" | 60" |
| Combinateur "Mémoire Active" | 670" | 1385" | 870" | 2090" | 708" | 1420" | 503" | 2115" | 561" | 2220" | 660" | 1830" | 577" | 1800" | 328" | | 716" | | 1218" | |
| Méthode I.B.M. | 671" | | 866" | | 704" | | 518" | | 543" | | 674" | | 565" | 299" | 299" | | 732" | | 1239" | |
| Simulateur analogique C.S.E.E. | | 1837" | | 3161" | | 2299" | | | | | | | | | | | | | | |

Nota : Il faut signaler qu'au cours de l'élaboration des stratégies par le combinateur "Mémoire Active", la hiérarchie intervariables a été rarement interrogée. Cependant à chaque fois que cet évènement s'est produit, l'application de la modification "prétraitement hiérarchique" consignée au paragraphe 54 a permis d'améliorer de 20 % environ la qualité de l'ordonnancement. Les résultats des exercices $S^{28}_5$, $S^{28}_6$, $S^{28}_9$, $S^{28}_{10}$ sont obtenus avec le meilleur des deux essais résultant de l'interrogation de la "hiérarchie interactions".

Il est à noter que pour certains exercices, la "Mémoire Active" retarde des trains sur les branches du triangle (1) ce qui aconduit à un ordonnancement dont le retard cumulé est égal à celui donné par la méthode I.B.M. Par contre les écarts en temps de retard qui désavantagent la méthode "Mémoire Active" sont imputables soit à sa nature heuristique, soit au fait que les critères de retards cumulés minima et de durée minimale de la stratégie globale sont différents, soit à la précision résultant de la discrétisation du temps en nombres entiers de pas $\gamma$.

## 6.18 - Vérification des solutions "Mémoire Active" par un programme en G.P.S.S. de simulation du trafic ferroviaire

Pour d'autres besoins de simulation du trafic, le Service de la Recherche S.N.C.F. possède un programme en langage G.P.S.S. qui permet de représenter l'évolution des trains sur des portions de réseau et de connaître l'état des signaux.

Il nous a paru très intéressant de vérifier sur ce programme que l'ordonnancement du trafic proposé par la "Mémoire Active" était réaliste et que les règles de circulation (affichées par les contraintes) étaient bien respectées.

Pour le problème réel à 17 trains, les vitesses moyennes des trains sur chaque canton (compte tenu des ralentissements imposés par la "Mémoire Active") ont été introduites comme données. Les résultats de la simulation montrent que la fluidification proposée est correcte car les retards cumulés sont nuls, ce qui prouve que tous les trains circulent constamment avec la présence du signal vert immédiatement devant eux (respect de l'hypothèse de deux cantons non occupés).

## 6.19 - Conclusions

La formulation du problème de GAGNY a permis de dégager une méthodologie d'application de la structure "Mémoire Active" à des configurations ferroviaires réelles.

Dans un autre domaine, elle a permis de juger de l'adaptabilité du combinateur aux problèmes de régime perturbé. Les premiers résultats très encourageants montrent que les stratégies sont en général aussi bonnes sinon meilleures que celles élaborées par les autres méthodes.

(1) Cette possibilité pourrait se traduire par un meilleur ordonnancement dans le cas où une machine HLP serait immobilisée sur une branche du triangle de telle sorte qu'elle permette le passage simultané de deux autres circulations sur le triangle. Il est à noter que cette situation ne s'est jamais présentée au cours des 10 exercices traités.

# CHAPITRE 7

## Projets d'avenir

AVERTISSEMENT

L'objet de ce chapitre est de préciser diverses directions de recherches envisageables ou en cours d'études qui devraient permettre d'aboutir un jour à un système cybernétique ferroviaire opérationnel intégrant une structure "Mémoire Active".

Le contenu du paragraphe 7.1 est partiellement réalisé, par contre, les idées avancées auxparagraphes 7.2 et 7.3 résultent d'une préétude personnelle globale, mais malgré tout assez superficielle étant donné l'ampleur du sujet. Il s'ensuit que la mise en oeuvre de la plupart des points développés devrait faire l'objet d'études plus approfondies.

## 7.1 - SIMULATION de l'ORGANIGRAMME FONCTIONNEL "MEMOIRE ACTIVE" sur ORDINATEUR

### 7.11 - Intérêt d'un moyen souple d'investigation

Nous avons vu au chapitre 5 que les recherches d'amélioration des performances consistaient à déterminer un bon critère de lever d'ambiguité, c'est-à-dire en fin de compte un critère qui permette de reconstruire correctement une trajectoire de l'espace à partir de ses projections. Or, il est clair que la mise en oeuvre d'un critère sur une logique câblée est délicate et ceci est d'autant plus vrai que l'on est contraint d'appliquer une méthode expérimentale, donc d'envisager plusieurs critères différents et de juger de leurs effets respectifs par comparaison des résultats. En conséquence, il a semblé techniquement plus intéressant et plus économique d'entreprendre une programmation sur ordinateur de l'organigramme fonctionnel du combinateur. Par cette méthode, il est facile par software d'envisager une multitude de critères et de mesurer leurs effets en comparant pour le problème P1 les solutions ainsi obtenues aux solutions théoriques et aux solutions données par le combinateur.

Il était également très intéressant de vérifier que la structure "logique câblée" répondait bien sur le plan fonctionnel à l'organigramme théorique. En effet, il faut se souvenir que l'organigramme esquissé jusqu'alors est une heuristique et que nous nous sommes efforcés d'en mesurer la valeur par comparaison des solutions données par un câblage répondant en principe à sa conception. Etant donné la complexité du problème et la difficulté au niveau de l'élaboration des circuits, de juger des performances exactes en examinant un grand nombre de situations possibles, (par un programme de test) il est raisonnable de se demander dans quelle mesure la technologie n'introduit pas une dérive supplémentaire qui altère les performances de l'heuristique employée. Si l'on convient de noter H les défauts de cette dernière par rapport à une méthode idéale et de repérer par H' les défauts mesurés sur le combinateur, il est possible que l'on ait : $H' = H + \varepsilon$ où $\varepsilon$ représente la dérive due à la réalisation technologique. Dans l'hypothèse d'une simulation fonctionnelle sur ordinateur on peut admettre (si le programme est correctement construit !) que la dérive est nulle et que par conséquent les solutions résultantes de cette méthode permettront de chiffrer les défauts notés H. Si $H' \neq H$, la dérive $\varepsilon$ existera et il sera vraisemblablement possible de l'annuler par corrective des circuits logiques.

Dans un autre domaine une programmation permettrait d'avoir une idée précise sur le temps de calcul global mais aussi sur les temps partiels dans les différents centres fonctionnels simulés de la Mémoire Active. A priori on peut dire que la méthode programmée ne réalisera pas les performances en temps de la logique câblée, car l'exploration en parallèle du C.A.S. ne peut être prise en compte sur ordinateur comme elle l'est sur la "Mémoire Active". C'est à ce niveau sans doute que se situe l'énorme avantage en temps de traitement de la structure "Mémoire Active" !
En conclusion, les multiples objectifs de la simulation de l'organigramme fonctionnel peuvent se définir comme suit :

- mise en oeuvre plus facile des recherches d'amélioration de performances (application de bons critères de lever d'ambiguité, voire du critère parfait),
- mise en évidence d'une dérive éventuelle entre la théorie du combinateur et sa réalisation technologique,
- mesure du gain en temps de traitement de la structure câblée par rapport à la même structure programmée et pour un ordinateur donné.
- évaluation des temps de traitements partiels ainsi que des volumes mémoire des différents centres fonctionnels simulés,
- à la lumière des résultats précédents, définir la répartition hardware et software d'un combinateur couplé avec un ordinateur compte tenu d'un compromis entre le respect de l'hypothèse de travail en temps réel (une minute) et le coût économique minimum de l'ensemble.

## *7.12 - Mise en oeuvre de la simulation*

### 7.121 - Généralités

En premier lieu nous avons utilisé une méthode de programmation classique, car nous pouvions disposer facilement d'un personnel qualifié (en langage FORTRAN) et du matériel adapté (ordinateurs IBM 1800 et UNIVAC 1108).

Sur un plan théorique et dans le but d'établir une comparaison sur les temps de traitement au niveau du C.A.S. (notamment) il serait souhaitable d'employer une technique très performante telle que la microprogrammation. Or, dans l'optique de définition d'une machine opérationnelle (couplage avec ordinateur) il nous a paru suffisant dans une première phase de travailler avec les moyens mêmes qui seraient mis en oeuvre en réalité, (c'est-à-dire une programmation classique), afin de faire des comparaisons saines en temps de traitement et de pouvoir en déduire une répartition hardware - software tenant compte de ces temps (mêmes s'ils ne sont pas techniquement les meilleurs possible compte tenu de nouvelles méthodes de programmation).

### 7.122 - Aperçu sur l'ordinogramme "Mémoire Active"

Par la voie de la programmation, on reproduit sur ordinateur l'organigramme fonctionnel de la "Mémoire Active" selon l'architecture donnée par la fig. 712 a. Afin de limiter le volume mémoire occupé dans l'unité centrale, on travaille successivement sur chaque C.A.S. L'exploration de ce centre, à l'opposé de la "Mémoire Active", se fait séquentiellement en examinant toutes les cases telles que le montre le schéma "exploration C.A.S.".

La méthode consiste à partir de SA à explorer d'abord une ligne en interrogeant successivement tous les points de cette ligne pour détecter la présence ou l'absence d'une "contrainte". A chaque pas possible, on affecte une unité supplémentaire au point interrogé par rapport au point précédent. Une exploration analogue est lancée pour la colonne passant par SA. Puis à partir de la case la plus éloignée de la ligne (A, B, V, VI), on cherche la valeur à donner au point A V, par interrogation successive de tous les points qui l'entourent (par exemple A VI, B VI, B V).

La valeur attribuée à A V est la valeur minimum des points comparés A VI, B V à laquelle on ajoute une unité. Cette exploration repérée 3 se fait de proche en proche en se rapprochant de SA. La même méthode est utilisée en colonne (repère 4).

Ainsi par réitération du procédé, on balaie tout le C.A.S. et on affecte des numéros aux cases comme s'il avait été procédé à une véritable exploration β. Les paramètres Nβ XO, Nβ XI, Nβ YO, Nβ YI sont alors disponibles et pourront permettre de définir le pas γ après vérification de cohérence et application des "critères de lever d'ambiguité".

## *7.13 - Résultats - Enseignements*

### 7.131 - Mesure de la dérive ε

Le passage complet sur ordinateur du problème P 1 formé par 36 exercices différents (voir paragraphe 5.34 et tableau 534 a) a permis de montrer qu'avec les mêmes hypothèses sur les hiérarchies HIV et HIA, les ordonnancements étaient rigoureusement identiques à ceux donnés par le combinateur "Mémoire Active".

Ces manipulations prouvent donc que H = H' et par conséquent que l'éventuelle dérive ε imputable à la technologie est nulle.

### 7.132 - Comparaison des temps de traitement en ordinateur et en "Mémoire Active"

A) Généralités

L'exercice n° 81 (voir tableau 534 a) a été choisi comme problème de test. Cependant pour considérer des temps de calcul permettant de faire des chronométrages avec une bonne précision, il a été nécessaire d'augmenter les poids des segments tout en conservant la même structure de problème. Pour cela, il suffit de faire une homothétie de rapport K, ce qui conduit à des exercices de même architecture mais de longueur (en pas) différente que nous conviendrons d'appeler "81 dilatés".

B) Temps de traitement global

1) K = 15 (765 pas γ)

- temps de calcul estimé sur le combinateur par la relation $\frac{3}{2} C_n^2$ L : 15"
- temps de traitement mesuré sur le combinateur 13,5"
- temps de calcul estimé sur ordinateur UNIVAC 1108 : 1 600".

C) Tableau (1) récapitulatif des temps de traitement et des volumes occupés pour les différents centres fonctionnels (problèmes 81 dilatés).

| n : Nb de variables | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| K | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 10 | 15 |
| Nombre de pas | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 | 500 | 750 |
| Temps de traitement global (secondes) | 8 | 34 | 79 | 169 | 295 | 1 000 | 1 600 |
| Volume global en unité centrale (en k mots de 36 bits) | 19 K | 19, 5 K | 20 K | 21 K | 22 K | | |
| Temps C. A. S. (secondes) | 4 | 21 | 64 | 142 | 275 | | |
| Volume C. A. S. (mots de 36 bits) | 700 | 1 400 | 2 100 | 2 800 | 3 500 | 7 000 | 10 500 |
| Temps C. V. A. (secondes) | 0, 2 | 0, 4 | 0, 6 | 0, 8 | 1 | | |
| Volume C. V. A. (mots de 36 bits) | 340 | 340 | 340 | 340 | 340 | | |
| Temps C. V. C. (secondes) | 4 | 5 | 6 | 9 | 11 | | |
| Volume C. V. C. (mots de 36 bits) | 1 000 | 1 000 | 1 000 | 1 000 | 1 000 | | |
| Volume C. A. S. + C. V. A. + C. V. C. (mots de 36 bits) | 2 040 | 2 740 | 3 440 | 4 140 | 4 840 | | |
| Volume occupé par le programme de traitement (mots de 36 bits) | 3 100 | 3 800 | 4 500 | 5 200 | 5 900 | | |
| Volume occupé par les données (mots de 36 bits) | 15 800 | 15 800 | 15 800 | 15 800 | 15 800 | | |

Valeurs estimées

(1) Les valeurs consignées dans ce tableau ne représentent que des ordres de grandeur étant donné la difficulté d'apprécier avec précision les temps de traitement et les volumes pris en unité centrale par des fractions de programme.

7.133 - Enseignements - Conclusions

Le tableau récapitulatif du paragraphe 7.132 montre que le temps de traitement dans le C.A.S. (simulé) croît très vite avec le nombre de pas et avec le nombre de variables et vaut plus de 100 fois le temps réel mis sur "Mémoire Active".

Cela montre en premier lieu que dans l'optique d'un couplage avec ordinateur il est hors de question de pouvoir réaliser le C.A.S. en software si l'on veut travailler en temps réel.

Par contre, il semble que les C.V.A. et C.V.C. tout en nécessitant un temps beaucoup moins grand en simulation que le C.A.S. réclament malgré tout un délai équivalent au temps de traitement global de la "Mémoire Active". La discussion sur la frontière entre le "câblé" et le "programmé" pourra se faire cependant au niveau de ces centres. Le compromis devrait intégrer des considérations économiques. Toutefois il faut souligner que la structure câblée C.A.S. - C.V.C. - C.V.A. forme un tout et qu'une dissociation du C.V.C. ou du C.V.A. de cet ensemble nécessiterait des études assez poussées afin de reconstituer un système hybride (C.A.S. câblé, C.V.A., C.V.C. programmés). Le choix devrait dépendre essentiellement du cahier des charges de la machine opérationnelle à construire.

A ce stade des études, la simulation de l'organigramme fonctionnel de la Mémoire Active sur ordinateur a permis de vérifier que la dérive technologique était nulle, de préciser la frontière entre le software et le hardware compte tenu des volumes occupés par les différents centres en unité centrale et de confirmer l'énorme avantage en temps de traitement de la structure câblée comparativement à une simulation d'une part et à un programme de permutations d'autre part.

Le même problème de test P 1 avant été traité par les trois méthodes a permis de déduire le réseau de courbes de la fig. 713 a.

La poursuite de ces études devrait en outre aider à définir de bons critères de "lever d'ambiguïté".

## 7.2 - ELABORATION d'un COUPLAGE de la "MEMOIRE ACTIVE" avec un ORDINATEUR

### 7.21 - Objet

Nous avons signalé au chapitre IV les raisons qui nous avaient fait retenir un affichage des données par matrices et par fiches. Le propos du présent paragraphe consiste à envisager la substitution de ce système d'entrée manuel par un organe automatique qui recueille l'information à l'endroit où elle naît (c'est-à-dire le terrain) et la présente aux centres de traitement de la "Mémoire Active".

De même la transmission des ordres résultant de la stratégie envisagée doit s'effectuer automatiquement en retour, vers la situation qu'on se propose d'optimiser. Etant donné le volume des paramètres à manipuler, il paraît logique d'utiliser un ordinateur qui assure cette fonction de gestion et d'aiguillage des entrées-sorties. Ainsi se pose le problème du couplage d'une Mémoire Active avec un ordinateur.

Sur le plan général, je distinguerai deux options fondamentales :

1) Le couplage "jonction"

L'ordinateur assure simplement la liaison entre les centres du combinateur tels qu'ils ont été définis et les systèmes afférents et efférents. L'organe d'optimisation est conservé intact et l'ordinateur pourrait travailler en "esclave" par rapport au combinateur qui serait "maître".

2) Le couplage "intégration"

L'ordinateur assure naturellement les fonctions du couplage jonction tout en intégrant certains centres de la "Mémoire Active". Le paragraphe précédent a montré que des centres tels que "cohérence" et "validation d'actions" et peut-être "module-trains", pouvaient être réalisés par software sur ordinateur sans réduire considérablement le temps de traitement de la "Mémoire Active". Le problème d'un dosage software-hardware pour les centres du combinateur se pose lui aussi.

Dans cette optique, l'ordinateur travaillerait en "maître" et le combinateur en "esclave". Cette solution entraîne évidemment une augmentation de volume de l'ordinateur, mais en contre-partie une réduction du combinateur qui fonctionnerait en fait comme un périphérique qu'on interrogerait pour "faire des choix" lorsque des problèmes combinatoires se posent.

Conclusion :

Dans l'état actuel des choses, les données nécessaires à la résolution d'un problème sont introduites dans le combinateur expérimental par un affichage manuel. Or cette opération exige beaucoup trop de temps par rapport à la durée de traitement du problème par la machine d'autant plus que tout affichage est spécifique à un problème donné.

La difficulté à résoudre est celle de rendre l'introduction des données plus souple, plus rapide et pouvant varier d'un problème à un autre . d'où la nécessité de relier la "Mémoire Active" à un calculateur et d'élaborer un dialogue entre ces deux organes.

## 7.22 - *Etude fonctionnelle du dialogue MA-ordinateur*

### 7.221 - Généralités

Pour définir le volume des transferts à effectuer entre MA et ordinateur, il faut déterminer la nature, le nombre des informations et des ordres que la machine reçoit et émet.

### 7.222 - Différents groupes de données à entrer sur une structure "Mémoire Active"

A ce stade, nous ne présumons pas du type de calculateur à utiliser. Cependant en vue de réaliser un premier recensement des informations à véhiculer, nous émettrons l'hypothèse que, d'une part les transferts calculateur-combinateur pourront avoir lieu, soit en séquence, soit en parallèle et que, d'autre part nous pourrons utiliser des mots de 16 bits.

A) Chargement des modules-trains

Nous rappelons que l'état du module situation-train permet de connaître la position du train le long de son itinéraire et l'éloignement de son but fictif :

- la position en canton du train est repérée par un registre 14 bits ;
- la position fine sur le canton est donnée par un compteur binaire 5 bits, pouvant coder jusqu'à 31.

L'éloignement de but fictif est obtenu par un compteur à 10 bits. Si x est le nombre de bits nécessaire à l'adressage, l'introduction automatique de ces trois groupes d'informations nécessiterait : $(14 + x) + (31 + x) + (10 + x)$ soit $(2 + 3 + 1)$ mots de 16 bits. Comme il existe un module par variable, il faudra : $14 \times 6 = 84$ mots.

B) Affichage des contraintes

Un C.A.S. étant formé de 14 cantons, on pourra traiter une ligne à 14 points de l'axe X avec 2 mots. Il suffira de combiner chaque ligne avec les 14 états de l'axe Y pour détecter la présence de contraintes aux intersections de lignes et de colonnes. Cela donnera : $(14 \times 2) + 2 = 30$.

Avec 14 variables, il y a 91 C.A.S., ce qui entraîne 2 730 mots.

C) Affichage des pondérations

Chaque canton peut avoir un poids de 31. Compte tenu de l'adressage, il faut avoir trois mots pour prendre en compte ce nombre. Or il est possible d'utiliser 14 variables donc $14 \times 14 = 196$ cantons de poids différents. Cela donne 598 mots.

D) Affectation des variables

Une variable correspondant à un train doit comporter une identité, une destination, une vitesse et une longueur. Deux mots semblent indispensables pour prendre ces caractéristiques en compte. Au total, il faudra : 2 x 14 = 28 mots.

E) Affichage de H.I.V. (Hiérarchie intervariables)

Il s'agit de classer 14 lettres. Deux mots paraissent suffisants.

F) Affichage de H.I.A. (Hiérarchie interactions)

Aiguillage commun-individuel : 1 mot. Chaque variable peut être en action 0 ou 1, 2 mots pour l'ensemble des 14 variables seront nécessaires, d'où 3 mots au total.

G) Affichage de P.R.I.O. (prioritaires)

Deux mots pour les 14 variables.

H) Modes de travail

- routage global
- routage limité
- routage arrêt 1er train routé

} 1 mot

I) Modes de fonctionnement

- statique
- dynamique

} 1 mot

J) Trains inscrits

Un mot

K) Codage du nombre de pas de routage limité

Nombre maximum : 999.

Ce chiffre codé en binaire demande 1 mot.

L) Codage de la période d'impression "Machine à écrire"

Maximum : 99 - 1 mot

M) Fonctions diverses de mise en marche et de commande : 20 mots

La gestion des entrées du combinateur nécessiterait un volume d'environ 3 500 mots de 16 bits.

7.223 - Informations de sortie

A) Transfert

Le combinateur redonne les éléments de la stratégie engagée en fournissant toutes les composantes du vecteur $\vec{\gamma}$. A chaque pas $\gamma$ la machine est capable de disposer d'un ensemble d'indications exploitables pour redonner des ordres aux circulations à ordonnancer.

Chaque variable constituant une composante de $\vec{\gamma}$, compte tenu de son identité, de sa position en canton et de sa position fine sur le canton, il faudrait un mot pour coder cet adressage ainsi que son pas (0 ou 1).

Il semble donc que 14 mots seraient nécessaires pour prendre en compte chaque pas $\gamma$. Sur le plan opérationnel, un découpage en pas $\gamma$ représente une quantification temporelle de l'ordre de 3s (le temps élémentaire de base pour GAGNY est de 2,62 s, voir ch. VII) qui est certainement trop fine en tant que période d'émission d'ordres.

Je crois qu'il faudrait considérer l'unité de temps réel ferroviaire d'une minute comme rythme temporel d'action sur les systèmes cybernétiques. Ce point de vue entraînerait le stockage des informations relatives à $\frac{60}{3}$ = 20 pas $\gamma$ successifs, d'où un volume "mémoire" de 20 x 14 = 280 mots.

En outre il faudra prévoir un traitement de ces 20 informations successives de vecteur $\vec{\gamma}$ afin de dégager après chaque minute une seule décision binaire par train (le ralentir en agissant sur le premier signal placé devant lui ou ne pas le ralentir).

B) Volume "mémoire" nécessaire au traitement des informations de sortie.

b1) Principe du traitement des ordres $\gamma$.

La trajectoire donnée par le combinateur est une trajectoire donnant une situation ordonnancée de la population de trains. Cet ordonnancement entraîne naturellement des modifications du graphique "espace-temps" de chaque train.

Le but du traitement est de déterminer l'écart entre la marche théorique que les trains sont censés respecter et la marche optimisée, déterminée par le combinateur. Cet écart $\varepsilon i$ est évalué en temps de retard pour une plage de temps et pour un train i.

Fonctionnellement, le traitement devra :

- détecter la présence d'un retard ;
- chiffrer la valeur de ce retard ;
- déterminer le type d'ordre à donner au train pour qu'il soit effectivement retardé de $\varepsilon i$.

La réalisation de ces fonctions suppose que l'ordinateur possède en mémoire la marche théorique des 14 trains pendant tout leur trajet considéré. Compte tenu de l'adressage, il faut à première vue un volume "mémoire" équivalent au volume nécessaire pour recevoir les composantes des 20 pas $\gamma$ pour une minute de trafic : soit 280 mots. Pour stocker le parcours complet des trains (de l'ordre de 400 pas $\gamma$), il faudra donc 280 x 20 soit 5 600 mots(1).

(1) Il est évident qu'une telle capacité "mémoire" n'est pas requise dans le cas où les trains respectent la marche théorique. Il faut cependant prévoir l'éventualité d'un incident ou d'une insuffisance de traction. Dans ce cas, la marche théorique devrait être recalculée en fonction des informations données par les capteurs de dérive (voir paragraphe 7.3422). C'est ce qui justifie la prise en considération de cet ordre de grandeur.

En outre il est nécessaire d'avoir un volume de traitement pour effectuer des comparaisons de temps et définir un ordre unique résultant par train.

Il s'agit d'additionner les actions pour chaque canton de chacune des 14 variables et de comparer cette somme à celle déduite des marches théoriques. En considérant deux mots par addition, un mot pour la comparaison et deux pour la conversion du résultat en éléments de décision (adressage compris), il faudrait cinq mots par variable, soit au total : 14 x 5 = 70 mots.

b2) Volume nécessaire à la prise en compte des "dérives".

Si on adopte le principe de la fluidification réévaluable périodiquement (F.R.P.) (Voir paragraphe 7.23), il faudrait disposer d'un certain volume "mémoire" permettant de considérer l'ordinogramme 723 c ainsi que les différentes boucles inhérentes à la mise en oeuvre de la F.R.P.

L'ordinateur devra notamment mémoriser l'heure de passage de chaque train sur les capteurs de dérive C Di et déterminer la position exacte des trains au moment où le dernier franchit le localisateur C Di afin de donner à la "Mémoire Active" la situation exacte de départ SD (voir fig. 723 b).

Compte tenu de la vitesse des trains prévue par la "Mémoire Active", l'ordinateur devrait évaluer la position exacte de chacun d'eux. En considérant 5 mots en moyenne par variable, il faudrait 14 x 5 = 70 mots pour définir SD.

Pour traiter l'ordinogramme 723 c et définir le coefficient K, de correction des marches théoriques, on peut estimer qu'il faudrait 2 000 mots.

7.224 - Bilan général du volume "mémoire" nécessaire au couplage type "jonction"(1)

- gestion des entrées : 3 500 mots
- gestion des sorties : 8 100 mots

Total ... 11 600 mots de 16 bits

Soit environ : 12 K mots de 16 bits

## 7.23 - *Idées générales sur un projet de "fluidification réévaluable périodiquement" (F.R.P.) - (voir fig. 723 a)*

7.231 - Problème posé

On dispose de trois ensembles disjoints :

- ensemble $\mathbb{S}$ de la situation réelle du terrain ;
- ensemble $\mathbb{T}h$ de la situation théorique (graphique espacement théorique de chaque train compte tenu de ses caractéristiques et de l'itinéraire emprunté) ;

(1) Il ne faut pas perdre de vue que le chiffre avancé est un ordre de grandeur destiné à préciser les idées sur le choix de l'ordinateur et qu'il ne résulte pas d'un bilan exhaustif.

- ensemble $\mathbb{M}$ de la situation ordonnancée par la "Mémoire Active".

Le problème est de trouver l'ensemble $\mathbb{M}$ le plus voisin de l'ensemble $\mathbb{T}h$ , (ce qui suppose que l'on soit capable de déterminer des solutions optima), compte tenu de l'ensemble $\mathbb{S}$ contenant deux sous-ensembles $\mathbb{S}_1$ et $\mathbb{S}_2$ qui pratiquement ne correspondent pas biunivoquement aux sous-ensembles respectifs $\mathbb{T}h_1$ et $\mathbb{T}h_2$ .

En effet si :

1) $\mathbb{S}_1 \Leftrightarrow \mathbb{T}h_1$ , cela signifie que les trains respectent exactement leur marche théorique, ce qui n'est pas toujours le cas (incident, insuffisance de puissance, etc.) ;

2) $\mathbb{S}_2 \Leftrightarrow \mathbb{M}_2$ signifie que les trains observent rigoureusement les ordres de fluidification, ce qui n'est pas toujours non plus le cas (avarie de transmission, mauvaise information, mauvaise application de l'ordre).

Devant cet état de fait, il est nécessaire de définir un rythme temporel et d'assurer un recadrage de l'ensemble $\mathbb{M}$ sur l'ensemble $\mathbb{S}$ à la fin de chaque temps du rythme. Sinon l'ensemble $\mathbb{M}_{\mathbb{T}h}$ élaborerait des solutions en tenant compte naturellement de l'ensemble $\mathbb{T}h$ mais sans s'assurer que l'ensemble $\mathbb{S}$ évolue selon les prévisions établies à la fin du temps précédent.

Ainsi, il faut réaliser une fluidification globale qui tient compte de l'origine et du but final des trains, mais cette fluidification globale doit être réévaluée périodiquement suivant la progression réelle des mobiles.

Je conviendrais d'appeler ce principe d'ordonnancement en feed back avec l'évolution réelle des situations : "Fluidification réévaluable périodiquement" (F.R.P.).

Le recadrage de l'ensemble $\mathbb{M}$ sur l'ensemble $\mathbb{S}$ doit se faire à l'aide de senseurs espacés géographiquement ou temporellement dans le but de réinitialiser le problème traité par l'organe de fluidification.

*Remarque :*

Ces idées sur la F.R.P. ne présument absolument pas de l'organe fluidificateur employé (Mémoire Active, Algorithme sur ordinateur, simulateur analogique, etc.). Cependant il est indispensable de définir un principe de fluidification opérationnelle afin d'avoir une idée assez précise sur les informations à échanger avec le "terrain".

7.232 - Principe d'une F.R.P. élaborée par un combinateur "Mémoire Active" (voir fig. 723 a)

Le recadrage de l'ensemble $\mathbb{M}$ sur l'ensemble $\mathbb{S}$ doit se faire à l'aide de senseurs (que nous convenons d'appeler : "capteurs de dérive CDi) espacés géographiquement ou temporellement et qui permettront de réinitialiser le problème sur la "Mémoire Active".

Considérons D 1 la situation de départ sur le terrain. Cette situation est convertie par l'ordinateur en informations M 1 pour la "Mémoire Active". Au bout de n pas $\gamma$, la "Mémoire Active" a élaboré la stratégie valable sur le terrain du point 1 au point 2. Ces n pas $\gamma$ sont effectués dans l'intervalle temporel t 1 - t 0 nettement inférieur à $\tau$ 1 2 temps réel d'évolution de la situation.

A l'instant t 1, les solutions S 1 disponibles en "Mémoire Active" sont converties par l'ordinateur en ordres décisoires O 1 présentés au point 2 et par conséquent pouvant être exécutés par les mobiles qui (à t 1) ne sont qu'à un point M intermédiaire entre 1 et 2.

A partir de t 1 avec les données D 1, la Mémoire Active peut poursuivre la construction de la stratégie pour aller du point 2 au point 3. Cette phase de n pas $\gamma$ terminée à t 2 permet d'envoyer à cet instant un ordre prévisionnel O' 1 appliqué au point 3. A l'instant t 2 les mobiles seront situés à un point N intermédiaire entre M et 2. De cette façon, lorsque les mobiles franchiront le point 2, ils auront déjà des ordres O' 1 pour continuer la stratégie engagée.

Cependant il est possible que les mobiles ne se présentent pas au point 2 à l'heure théorique prévue (incident, insuffisance de traction, etc.). A ce point 2, il faudra connaître l'heure réelle de passage des mobiles et corriger en conséquence la stratégie envisagée du point 2 au point 3.

Le passage réel des mobiles sur le capteur de dérive CD2 donne lieu à une nouvelle situation D 2 qui sera transformée par l'ordinateur en une nouvelle situation de départ M 2. La "Mémoire Active" initialisera le problème en fonction de M 2 et évaluera la stratégie réelle nouvelle à envisager pour passer du point 2 au point 3. Cela entraînera un ordre décisoire O 2 qui viendra corriger l'ordre prévisionnel O' 1. Ainsi il s'opérera un recadrage périodique de l'ordonnancement M. A. avec l'évolution de la situation réelle du terrain. Notons que de t 2 à t 3, la Mémoire Active élaborera la stratégie permettant de passer du point 3 au point 4 par l'émission de l'ordre prévisionnel O' 2.

L'avantage présenté par une telle méthode est que l'optimisation de chaque fraction se trouve toujours réalisée en prenant en considération des données globales du problème (vitesses, distances et but final).

Principe du recadrage (voir fig. 723 b)

Pour élaborer la future stratégie du temps i, il faut que la situation de départ de ce temps soit réellement connue afin que la "Mémoire Active" puisse traiter le problème avec la base S i.

Le principe consiste à considérer comme situation de départ S D la position des variables à l'instant où la dernière franchit le capteur de dérive C D. Chaque variable (a, b et c sur la fig. 723 b) est censée avoir progressé selon l'ordre prévisionnel applicable en i + 1.

Si un ou plusieurs mobiles sont en retard au passage de C Di par rapport à l'heure prévue, il faut interroger leur passage respectif à CD (i - 1). Si le passage s'est fait à l'heure théorique, on conserve la vitesse prévue pour le train, sinon cela signifie que l'on est en présence d'une insuffisance de traction.

En faisant l'hypothèse que cette avarie se poursuivra sur le reste du trajet, il faut corriger la vitesse théorique du train considéré pour le trajet qu'il lui reste à effectuer en appliquant un coefficient K de réduction de la vitesse moyenne. De cette façon le temps de parcours du train augmente et son chemin dans les C.A.S. croît. Tout se passe comme s'il avait acquis de la priorité. Ce train aura donc tendance à être moins ralenti que les autres qui, seront en conflit avec lui.

Dans le cas où, suite à un ralentissement, le train ne se présente pas à l'heure prévue par la "Mémoire Active" au capteur de dérive CD, il y a lieu d'étudier la cause de l'incident suivant l'ordinogramme 723 c.

*Remarques :*

Sur la fig. 723 b, si le train d était très en retard, la situation SD aurait été communiquée à la "Mémoire Active" lorsque a serait arrivé au CD (i + I). Le train d n'étant pas arrivé au CD i sera considéré en CD (i + I).

## *7.24 - Elaboration du dialogue ordinateur-combinateur (cas d'un couplage "jonction")*

### 7.241 - Généralités

L'ordinateur n'assurant que la gestion des entrées-sorties de la "Mémoire Active", il serait souhaitable de la faire travailler périodiquement suivant le principe de la "fluidification réévaluable périodiquement" (F.R.P.). Cette période serait définir par une horloge qui donnerait le rythme temporel (fig. 724 a).

La période serait $\tau$ I 2 qu'il reste à chiffrer en fonction du problème opérationnel traité. Je pense que $\tau$ I 2 devrait être au minimum égal à l'unité de temps réel (I'). Le temps t I 2 représente la durée de travail de la "Mémoire Active" qui lui est nécessaire pour élaborer la stratégie qui se déroulera pendant la période $\tau$ I 2. Notons que le quotient $\frac{\tau \text{ I } 2}{t \text{ I } 2}$ donne le rapport de simulation $\frac{\text{temps réel}}{\text{temps simulé}}$

### 7.242 - Esquisse d'organigramme pour un couplage "jonction" (voir fig. 724 b)

## *7.25 - Elaboration du dialogue ordinateur-combinateur (cas d'un couplage type hybride)*

### Généralités

L'ordinateur pouvant avoir d'autres périphériques que la "Mémoire Active" et étant par essence moins figé qu'elle, nous pensons que celui-ci pourrait jouer le rôle de "maître", la Mémoire Active travaillant en "esclave". Le calculateur étant chargé de traiter des problèmes d'ordonnancement et travaillant avec un programme aura besoin, à un certain moment, de faire traiter un problème par la "Mémoire Active" et d'en exploiter les résultats.

Une fois le résultat fourni, le calculateur pourra poursuivre son travail en fonction de nouvelles données. Il semble donc que les échanges d'informations entre ordinateur et "Mémoire Active" devront se faire par l'intermédiaire d'un coupleur.

Sur le plan fonctionnel, l'organigramme (fig. 724 b) esquissé pour un couplage "jonction" est encore valable. Cependant il faudrait construire un organigramme qui réglerait les échanges en cours de traitement entre l'ordinateur et la "Mémoire Active".

Ce couplage conduirait à un ensemble hybride central représenté en 73 a. Notons que le volume de l'ordinateur devrait être augmenté en conséquence pour prendre en compte des calculs auxiliaires actuellement effectués par la voie digitale sur le combinateur S.N.C.F.

## *7.26 - Remarques : possibilité de couplage avec un perceptron*

Le "perceptron" comme on l'a déjà vu, est capable de classifier des formes grâce à sa fonction de perception simplificatrice. On peut dire qu'il fait preuve d'apprentissage gnostique. L'importance éventuelle de cette machine réside dans le fait que donnant une réponse identique pour toute une famille d'informations distinctes, il est possible à un organe de calcul ainsi alimenté de faire une grande économie de movens, puisqu'il n'aura à prendre en compte qu'un nombre relativement restreint d'informations.

Le "perceptron" purifie en quelque sorte l'espace pour ne conserver que la trame d'informations utiles. Il est possible d'ailleurs que les choses se passent ainsi dans le cerveau.

On pourrait alors concevoir un système de ce genre en amont d'une Mémoire Active. Il filtrerait les informations fondamentales de celles qui ne le sont pas. Cela permettrait de réduire la capacité de la Mémoire Active, ou à capacité égale, d'augmenter considérablement ses possibilités de prise en compte.

Dans cet ordre d'idées, on aurait un ordinateur gérant l'ensemble des informations collectées. Un "perceptron" prendrait en compte ces informations et effectuerait un tri en ne conservant que celles qui présentent un intérêt fonctionnel. Cet ensemble réduit de données serait ensuite communiqué à la "Mémoire Active" pour traitement. On réaliserait ainsi un couplage tripolaire : ordinateur - perceptron - Mémoire Active.

## 7.3 - INTEGRATION dans un SYSTEME CYNERNETIQUE FERROVIAIRE OPERATIONNEL

### 7.31 - La pensée "cybernétique"

Le sens étymologique du terme "cybernétique" serait issu des fêtes grecques, les "Cybernesis" qui exaltaient l'art des pilotes et célébraient les aptitudes de ceux-ci à connaître la situation des navires, à décider des directions à suivre, à se "concilier les dieux" pour faire atteindre aux bâtiments le but fixé quelles que soient les péripéties de la traversée. C'est vraisemblablement de ce terme de pilote "Kubernètes", l'homme qui gouverne, que dérive "Kubernicos" qui a donné naissance à "cybernétique".

De nos jours, il semble que la cybernétique se présente plutôt comme une méthode fondée sur la logique, utilisant des moyens scientifiques et technologiques puissants pour atteindre un but grâce à des systèmes conçus par l'homme.

Le but étant fixé (gestion automatique d'un réseau ferré par exemple), afin d'être plus apte à intégrer correctement le combinateur "Mémoire Active" dans le système, nous avons voulu dégager les principales composantes de l'acte cybernétique :

- mise en évidence, par une analyse logique, et sans préjuger des moyens à mettre en oeuvre, des suites d'opérations qui permettront d'atteindre le but.
- transposition par l'intermédiaire de systèmes, de la séquence de mise en oeuvre sous forme d'un modèle.
- évaluation de la durée souhaitable de l'acte cybernétique afin de respecter l'objectif de temps réel. Cela signifie que le système doit être capable de recueillir les données, de les analyser, de tirer les résultats et de restituer ceux-ci au processus avant que l'évolution des dites données ne les ait périmées.
- détermination des moyens techniques à réaliser pour rendre le système opérationnel.

Ainsi la cybernétique apparaît actuellement comme une méthodologie fondée sur l'étude des systèmes, utilisant des moyens scientifiques et techniques modernes pour la mettre en application.

### 7.32 - Mise en oeuvre de l'acte cybernétique

Toute activité humaine orientée vers l'efficacité peut se décomposer suivant les phases suivantes :

- documentation,

analyse des buts à atteindre en fonction des besoins,

- décision tendant à optimiser quelques critères tels que les coûts, les bénéfices, les temps, etc...
- exécution des décisions,
- contrôle des effets des d-

Dans le passé toutes ces activités se déroulaient sur un rythme assez lent car l'homme constituait le meilleur outil.

Le système cybernétique plus global est constitué d'organes de prises d'informations, d'élaboration des ordres, d'exécution de ces ordres et enfin d'un organe de gestion, qui en contrôlant les résultats fixe de nouvelles directives.

Il comprend ainsi :

1) Un système afférent formé par des "senseurs" chargés de recueillir les informations à l'endroit où elles naissent (domaine de l'automatique).
2) Un système de mémorisation capable de stocker les informations de données sous une forme aisée à consulter (domaine de l'informatique).
3) Un ensemble de traitement assurant :
   - le travail d'analyse et d'exécution des instructions, c'est-à-dire des ordres donnés par l'homme.
   - les travaux de servitudes (conversions de messages analogiques-numériques ou numériques-analogiques permettant les communications entre les divers appareils) (domaine de l'informatique).
4) Un dispositif de communication homme-machine spécialement conçu pour faciliter le dialogue entre le système et l'exploitant humain (domaine de l'ergonomie).
5) Un système de liaison entre tous les organes cybernétiques, susceptible d'utiliser toutes les ressources des techniques de télécommunications (domaine de l'automatique).

Comme nous pouvons le constater, un ensemble cybernétique utilise des moyens appartenant aux disciplines les plus diverses et les plus évoluées (logique, mathématiques, informatique, automatique, ergonomie, etc.).

## 7.33 - *Applications globales de la cybernétique au chemin de fer*

### 7.331 - Système global

L'élaboration d'un système unique applicable à la totalité d'un réseau ferré n'est pas encore applicable actuellement. Il convient pour le moment d'envisager un certain nombre de sous-systèmes, axés respectivement sur les fonctions principales à exercer par un chemin de fer. Cela provient de la complexité des sociétés d'exploitation de réseaux qui comportent d'une part de nombreuses fonctions (techniques, commerciales, administratives, d'études) nettement différentes à l'échelon de la direction et d'autre part des unités géographiques (lignes, gares, dépôts, triages) où se trouvent des installations et des moyens en vue d'assurer sur le plan local des opérations de transport dont les diverses fonctions sont en constante interaction.

7.332 - Sous-systèmes

En pratique, si l'exploitation d'un réseau ferré constitue un système avec des objectifs globaux fixés par la Direction, sa complexité conduit à la décomposer en un certain nombre de sous-systèmes qui peuvent se rattacher à deux types :

- les sous-systèmes "fonctionnels", tels que la gestion d'une catégorie de trafic, de personnel, des approvisionnements, des stocks, du matériel moteur ou remorqué, la location des places des voyageurs, la comptabilité, les contrôles budgétaires des prix de revient, les tarifs en fonction des coûts réels.
- les sous-systèmes géographiques, tels que l'exploitation d'une ligne ou d'une gare de triage.

Notons que ces distinctions sont évidemment artificielles mais indispensables pour analyser le fonctionnement du système global.

7.333 - Les rythmes de la gestion ferroviaire

Le fonctionnement du chemin de fer, comme celui de toute entreprise à activité continue, s'articule autour de trois rythmes fondamentaux auxquels correspondent des "unités de temps réel" dont l'ordre de grandeur est très différent.

1) Un rythme opérationnel correspondant à la circulation des trains et à la fonction commerciale (location électronique des places, taxation quasi automatique des expéditions marchandises, transmission d'informations aux clients importants sur l'acheminement des marchandises qui leur sont destinées). Aussi la minute constitue une unité de temps réel valable (manoeuvre des signaux, messages télégraphiques, temps moyen d'occupation des cantons par les trains).

2) Un rythme tactique correspondant à la gestion en général. Ce rythme se rencontre :
   - dans le trafic voyageur et marchandises (tributaire d'une évolution saisonnière).
   - dans l'administration du personnel, la gestion financière, l'organisation technique.

L'unité de temps réel tactique varie entre l'année, le trimestre, le mois, ou la semaine suivant les problèmes considérés.

3) Un rythme stratégique correspondant à la planification, à la définition des politiques.

On le rencontre dans les programmes d'investissement, l'adaptation des réglements, la recherche, le marketing, etc.

L'unité moyenne de temps stratégique est de cinq ans.

Conclusions :

Etant donné ces trois rythmes et les divers problèmes que chacun d'eux suscite, il est nécessaire d'envisager pour l'instant des systèmes cybernétiques variés ayant leur domaine d'application propre (sous-systèmes), le système global paraissant encore inabordable de nos jours.

Pour intégrer notre "Combinateur Mémoire Active" dans un système cybernétique, il fallait donc en premier lieu choisir le ou les systèmes susceptibles de le recevoir. Etant donné ses paramètres de conception déduits du "triangle de GAGNY", il nous a semblé normal de commencer par l'esquisse d'un schéma d'intégration relatif au rythme opérationnel et reposant sur l'automatisation de la circulation. Il est bien évident que beaucoup d'autres schémas sont envisageables, notamment la gestion centralisée du trafic marchandises et la gestion financière.

## 7.34 - *Intégration du combinateur dans un système cybernétique opérationnel d'automatisation de la circulation des trains*

### 7.341 - Idées de conception

Dans l'élaboration d'un système cybernétique, il est intéressant de rechercher les solutions mettant en action les centres de commandes, les hommes et les machines.

Les engins moteurs peuvent être automatisés à divers degrés qu'il convient de définir dans une optique d'avenir. Les centres de commande et de contrôle peuvent être ainsi intégrés à des ensembles fonctionnels plus ou moins centralisés. On aboutit ainsi à quatre conceptions générales d'une automatisation de la circulation.

#### 7.3411 - Conception actuelle adoptée :

Elle est basée sur une signalisation latérale au sol qui peut être aménagée pour permettre à plus long terme de s'intégrer dans l'une des autres conceptions suivantes.

#### 7.3412 - Conception centralisée

Les idées directrices sont les suivantes :

- un ensemble informatique central émet et reçoit des informations et prend des décisions de mouvements et d'exploitation des lignes et des noeuds : il est en relation directe et en feed-back avec l'infrastructure, les mobiles et le contrôle de la circulation.
- les locomotives sont relativement peu "intelligentes" : elles se limitent à l'exécution d'ordres reçus et à l'émission d'informations concernant leurs caractéristiques cinématiques (vitesse, position) et leur identité.
- les infrastructures reçoivent des commandes, les exécutent et émettent des informations de contrôle à destination de l'ensemble central qui commande, contrôle et décide dans les domaines de l'alimentation des lignes aériennes de traction électrique, de la formation des itinéraires, du fonctionnement des passages à niveau.

Cette méthode implique de connaître en temps réel la position de tous les trains et de réguler leur vitesse de manière à garantir les espacements de sécurité. Cette suivie ponctuelle des trains peut être faite à l'aide de câbles posés dans l'axe de la voie et parcourus par des courants de différentes fréquences.

7.3413 - Conception décentralisée : (lignes de banlieue)

Les vecteurs directeurs sont les suivants :

- la régulation centrale, avec les seuls moyens de télécommunications et de contrôle de trafic, donne les instructions d'exploitation.
- les locomotives sont "intelligentes" et prennent des décisions, commandent et contrôlent les itinéraires, l'espacement des mobiles et d'une manière générale, interviennent sur les infrastructures y compris les passages à niveau.
- les infrastructures reçoivent des locomotives les instructions qu'elles exécutent. Elles leur adressent en retour pour contrôle, les informations correspondantes.

Cette automatisation décentralisée nécessite un réseau de télécommunications très évolué (en particulier les liaisons entre matériels roulants) et un automatisme embarqué à bord des mobiles (marche programmée).

7.3414 - Conception hybride

C'est une conception intermédiaire entre les deux précédentes. L'automatisation de la circulation revêt deux aspects :

- celui du maintien des trains dans le respect de l'horaire,
- celui de leur régulation en cas de conflits, c'est-à-dire lorsque le respect des horaires s'écarte d'une certaine rigueur.

En ce qui concerne cette conception hybride, on considère que la sécurité est assurée par les cantons fixes d'une signalisation de "block" automatique classique. Les programmes de marche et de conduite des trains sont analogues à ceux de la conception décentralisée. Par contre, la fonction de régulation, de réordonnancement et d'établissement des itinéraires est fortement centralisée et dotée d'un réseau d'informations en temps réel qui lui permet de prendre des décisions.

Considérée au niveau d'un système cybernétique, la régulation du trafic des trains constitue un sous-système très important car il s'agit de gérer un ensemble hétérogène de mouvements, composés de trains de grandes lignes, de trains de banlieue et de trains messageries.

Ce sous-système comporte quatre niveaux :

1) la prise des informations et lexécution des décisions.
2) le traitement des informations.
3) la supervision d'un homme (régulateur), la prise et le contrôle des décisions.
4) l'aide à l'exécution des décisions, c'est-à-dire l'élaboration et l'emmagasinage dans un programmateur de suites d'ordres destinés aux postes d'aiguillages et aux trains en circulation sur la ligne.

7.342 - Schéma d'intégration du combinateur en conception décentralisée ou hybride (voir fig. 73 a)

Pour des raisons de coût, il semble que les conceptions décentralisées soient les plus avantageuses. Etant donné le nombre et la disparité des locomotives, on a intérêt à retenir les solutions qui impliquent le minimum de matériel embarqué.

7.3421 - Structure du système

Nous utilisons un ensemble "Mémoire Active" - ordinateur couplé tel que nous l'avons défini au par. 7.2

L'unité de traitement (UT) assurerait la gestion des entrées - sorties du combinateur ainsi qu'une partie des calculs auxiliaires (fonctions C.V.A. éventuellement).

L'unité optimisante UO serait chargée d'élaborer les solutions des problèmes combinatoires transférés par UT, l'UO fonctionnerait en esclave et l'UT en maître. Cet ensemble UT + UO formerait un Ensemble Hybride Central (E.H.C.) qui gèrerait une partie du réseau.

Le système afférent (senseurs) serait formé de détecteurs (D) (position, vitesse) et d'identificateurs (I) (identité, caractéristique du train) qui collecteraient toutes les informations relatives aux données du trafic. Ces informations seraient directement prises en compte par l'UT qui les distribuerait ensuite au moment voulu à l'UO.

Seraient entrées aussi sur l'UT toutes les informations relatives au désir de l'exploitant (système de préférence de l'homme formé de la priorité (PRIO), de la hiérarchie intervariables (HIV) et de la hiérarchie interactions (HIA).

Les solutions élaborées par l'UO seraient présentées par l'intermédiaire de l'UT à l'homme (surveillant de trafic) sur une console de visualisation polychrôme. L'homme aurait alors la possibilité d'accepter ou de refuser cette solution en dialoguant avec l'E.H.C.

Si une solution est analysée par l'homme, l'E.H.C. enverrait alors les ordres correspondants sur le terrain (signalisation). Les trains modifieraient leur vitesse afin que la fluidification se réalise suivant la solution proposée par l'UO. A titre d'archives, on conserverait l'histoire des situations passées sur un histogramme.

7.4322 - Feed-back de fluidification (correction des dérives) voir fig. 73 b et fig. 724 b

Un ordonnancement avant été déterminé par l'E.H.C. il est important d'établir une boucle de retour entre la situation prévue par l'ensemble informatique et la situation réalisée efffectivement sur le terrain par les mobiles.

Les vitesses introduites à l'UO sont en effet des vitesses théoriques tenant compte de l'identité des trains, mais rien ne prouve que ces trains la respectent réellement. Il risque donc de s'introduire des "dérives" de situation entre l'E.H.C. et le terrain. Pour compenser ce phénomène, il faudrait posséder des informations supplémentaires sur la position des trains au cours de leur trajet sur la configuration prise en compte par l'E.H.C. Ces informations de position pourraient être données par des "capteurs de dérive".

L'heure de passage réelle (Hr) du train serait comparée à l'heure théorique Ht enregistrée par l'E.H.C.

Si Ht - Hr = $\varepsilon \neq 0$, il faudrait envoyer à l'UO des indications supplémentaires destinées à corriger cette dérive.

A chaque passage de mobile sur un "capteur de dérive", il pourrait y avoir une réinitialisation du problème en "situation de départ" sur l'UO. D'autre part on pourrait corriger la vitesse théorique des trains en fonction de leurs performances en début de trajet. Une impuissance de locomotive par exemple pourrait donner lieu à une vitesse moyenne Vmoy entre deux capteurs de dérives qui serait considérée comme vitesse théorique à afficher en pondération d'itinéraires pour le reste du parcours.

*Remarques :*

Les capteurs de dérives pourraient être commandés au moment du franchissement des zones de voies par un des relais qui permettrait les changements d'état des signaux. L'ordre de grandeur de l'espacement moyen entre capteurs serait d'un kilomètre, ce qui représente un délai de parcours d'une minute pour un train circulant à 60 km/h.

Ces considérations permettraient d'adopter le rythme temporel de 60 secondes qui correspond aux 20 pas $\gamma$ (Mémoire Active) définis au par. 7.223. Ainsi on pourrait subordonner la phase d'émission d'ordres pour les 60 secondes futures aux résultats réels obtenus de la part des mobiles par l'intermédiaire du "feed-back" de correction des dérives.

## *7.35 - Conclusion*

L'intégration du combinateur "Mémoire Active" dans un système cybernétique réel suivant le schéma 73 a correspond assez bien à la définition du terme "cybernétique" que M. Louis ARMAND donnait déjà en 1963.

"La cybernétique est à la fois tout ce qui permet d'organiser au moyen d'ordinateurs et ce qui rend possible la mise en oeuvre de l'automatisme et de l'automation. Cet ensemble est constitué par le mélange des ordinateurs qui pensent et qui commandent et les appareils automatiques qui réalisent".

Pour nous, ce mélange d'ordinateurs serait constitué par ce que nous appelons l'Ensemble Hybride Central (E.H.C.). Les ordinateurs qui pensent entreraient dans le cadre de notre unité optimisante (UO) et l'ordinateur qui commande serait représenté par l'unité de traitement (UT).

# CHAPITRE 8

# CONCLUSION

## 8.1 - Le COMBINATEUR ELECTRONIQUE S.N.C.F. : un TREMPLIN pour le FUTUR

### 8.11 - Généralités

Au cours de cette thèse, je me suis efforcé de montrer comment un ensemble d'idées reposant sur des considérations relevant du domaine de la neurophysiologie pouvait conduire à la réalisation d'une machine capable de résoudre des problèmes concrets. Je n'ai pas eu la prétention de porter un jugement sans appel sur un sujet à la fois brûlant et controversé.

Ma contribution s'est traduite dans le Livre 1, par une tentative de clarification, de mise en ordre et de formulation. Ensuite, dans le cadre de mes travaux sur le combinateur S.N.C.F., la rédaction du Livre 11 m'a permis de rapporter ici les paramètres fondamentaux de conception ainsi que l'aspect fonctionnel des organes principaux de cette machine.

Il m'a semblé parfois intéressant de préciser certains circuits qui jouent un rôle "clé" dans son fonctionnement. Cet examen assez détaillé a pu permettre au lecteur, je l'espère, de mieux comprendre l'objet de mes préoccupations relatives aux limites de la machine et à la validité de ses résultats ainsi que la raison d'être de certaines modifications de structure que j'ai envisagées dans le but d'en améliorer les performances. Les manipulations que j'ai montées ou qui sont en cours aideront, je le crois, à faire le point sur un sujet susceptible de déboucher vers de nombreuses applications dans l'avenir.

### 8.12 - Mission à remplir

La machine S.N.C.F. étant avant tout, je le rappelle, un outil de laboratoire, les objectifs de développement ont été les suivants :

- Juger de la validité des résultats sur des exercices simples dont on connaissait les solutions par d'autres moyens,
- Confirmer la possibilité de travail en temps réel sur des problèmes concrets,
- Préciser la durée de traitement comparativement à celle des ordinateurs,
- Définir une méthodologie d'exploitation permettant de tirer le meilleur parti possible de cette structure nouvelle,
- Permettre la formulation et l'adaptation de problèmes ferroviaires réels (définition du dialogue homme-machine) et montrer ses capacités de prise en compte pour de tels exercices,
- Examiner la souplesse d'exploitation et l'adaptabilité à d'autres familles de problèmes concrets,

- Donner une idée assez précise sur le coût d'une telle innovation et des avantages économiques immédiats et futurs comparativement aux autres méthodes connues jusqu'à maintenant,
- Entraîner des retombées indirectes qui se traduisent par :
  - une meilleure compréhension de la structure "Mémoire Active",
  - une formation poussée des personnes directement en contact avec la machine et une familiarisation accrue du personnel dirigeant avec cette nouveauté.

*8.13 - Enseignements apportés*

Le dépouillement des diverses séries de manipulations dans le cas du problème P 1 "d'ordonnancement de trains au départ" permet d'avancer un pouvoir optimisant moyen de 0,7. Ce résultat est certes intéressant mais tout de même loin de l'optimum. La modification que j'ai proposée et dont les conséquences ont pu être chiffrées grâce à la manipulation de "prétraitement de la hiérarchie intervariables" permet d'obtenir un pouvoir optimisant moyen de 0,95 pour le même problème P 1.

Ce résultat est très encourageant sur le plan des études mais aussi dans une optique opérationnelle. Une machine donnant systématiquement un tel résultat serait parfaitement viable dans la réalité. En effet, on peut estimer qu'un système automatique capable de donner en temps réel des solutions dont le module serait en moyenne supérieur de 0;76 % au module de la solution optimum serait tout à fait opérationnel. A l'heure actuelle, trois alternatives sont envisageables :

- ou bien on connaît la solution optimum par ordinateur, mais cette solution arrive trop tard pour permettre de gérer dynamiquement un processus (cas d'un trafic ferroviaire complexe),
- ou bien on se réfère au savoir-faire de l'homme pour déterminer les meilleurs choix. L'expérience prouve, d'une part que ces choix correspondent de toutes manières à des modules assez éloignés de l'optimum et que, d'autre part la qualité du choix humain est très dépendante de l'expérience et de l'humeur du "décideur", d'autant plus que la décision doit être prise très rapidement. Dans certains cas, même, le choix risque d'être catastrophique (moins bon que celui donné par un tirage au sort),
- ou enfin on se fie à un choix résultant du hasard (tirage au sort), possible dans une optique de temps réel. Pour le problème P 1, l'espérance mathématique des solutions donne des modules supérieurs de 16 % à celui de la solution optimum.

Toutes ces considérations montrent qu'avec un $P_0 = 0,95$, une machine optimisante est très bien placée. Ce n'est hélas pas l'optimum à coup sûr. Cependant, il vaut mieux accepter une solution légèrement boiteuse, mais disponible immédiatement plutôt qu'une solution exacte qui arrivera trop tard.

Dans les problèmes de gestion de trafic ferroviaire "en régime perturbé", nous avons pu constater que le niveau combinatoire était moins important que dans un "problème d'ordonnancement au départ". L'exemple du "Triangle de Gagny" montre que les conflits ont lieu en général entre

deux trains seulement. Il en résulte que la machine doit rarement lever une ambiguité provoquée par deux actions possibles sur une variable. L'impression pas à pas du problème de Gagny montre que la hiérarchie intervariables est rarement interrogée).

En conséquence, il est possible d'affirmer que le pouvoir optimisant dans ces conditions est de l'ordre de 0,95. Il est évidemment difficile de le mesurer car il faudrait connaître la meilleure des solutions par une autre méthode capable de la donner. Or, les différents systèmes qui existent à l'heure actuelle (Branch and Bound IBM et simulateur CSEE) reposent sur des hypothèses simplificatrices (plus de fluidification de la "marche" des trains sur une zone délimitée arbitrairement qui recouvre le triangle) qui ne permettent pas de garantir l'optimum optimorum théorique.

Néanmoins, les résultats des trois systèmes travaillant avec les mêmes paramètres de base peuvent être comparés. Jusqu'à maintenant, le combinateur "Mémoire Active" détermine un ordonnancement entraînant un retard cumulé de trains équivalent à celui donné par la méthode IBM et inférieur à celui du simulateur CSEE. Ce niveau d'examen permet à nouveau d'être optimiste sur la validité des solutions données par le combinateur, validité confirmée d'ailleurs par une autre méthode de simulation (G.P.S.S.) du trafic ferroviaire.

Il faut toutefois souligner que ces résultats sont partiels car ils ne s'appliquant qu'à deux configurations. Il reste bien sûr de nombreuses études à entreprendre sur d'autres problèmes en vue de déterminer un pouvoir optimisant minimum moyen généralisé, caractéristique de base de la machine, qui serait applicable dans tous les cas.

Les possibilités de travail en temps réel sont également confirmées. Le traitement des exercices réels que j'ai passés n'a pas excédé quelques secondes. Pour vérifier la limite supérieure en temps de calcul de la machine, j'ai traité un exercice dans lequel les variables ne pouvaient évoluer qu'une par une en parcourant tous les cantons pondérés à 31 de l'itinéraire. Ce problème irréel destiné simplement à chiffrer une borne supérieure entraînant 48 secondes de temps de traitement. Ce chiffre est de toute façon bien compatible avec notre hypothèse d'une minute de travail en temps réel pour la gestion du trafic ferroviaire.

Le problème P 1 traité comparativement sur ordinateur UNIVAC 1108 et sur le combinateur "Mémoire Active" a fait apparaître un rapport d'environ 80 dans le temps de traitement à l'avantage de la "Mémoire Active" actuelle, réalisée cependant avec une technologie très classique D.T.L. Notons qu'une technologie plus performante et une structure améliorée permettrait aisément de le réduire dans un rapport de 100, ce qui donnerait un gain en temps de 8 000, comparativement à l'ordinateur. En outre, les études de simulation par la programmation classique de l'organigramme "Mémoire Active" sur calculateur permettant d'obtenir un rapport de 130 dans le temps de résolution d'un même problème à l'avantage de la "Mémoire Active" câblée. Ceci semble confirmer l'idée qu'il faille réaliser en partie cette structure en logique câblée pour satisfaire aux hypothèses de temps réel. Peut-être qu'une simulation sur ordinateur par la voie de la microprogrammation démentirait ce point de vue.

Sur un plan plus pratique, le simulateur SNCF s'avère d'une grande souplesse d'exploitation et d'une extrême adaptabilité aux diverses configurations ferroviaires. Jusqu'à présent, j'ai pu formuler des problèmes variés tels que "l'ordonnancement au départ", le "triangle de Gagny", la voie unique, la gestion des quais d'une gare terminale, etc. Sur cette même machine, il serait possible de traiter des problèmes d'ordonnancement d'atelier, de gestion d'aéroport, etc. Une des caractéristiques fondamentales de cette structure réside dans son universalité.

Au point de vue économique, nous n'avons pas suffisamment d'expérience pour chiffrer avec exactitude le prix de l'heure d'une "Mémoire Active". Signalons cependant que le prix de revient des études et de la réalisation du combinateur SNCF est comparable à celui des autres méthodes employées pour traiter le "Triangle de Gagny". Le gros avantage immédiat réside dans le fait que cette machine, bien qu'ayant été conçue pour résoudre un tel problème, n'est pas spécialisée et qu'elle peut être utilisée gratuitement en sous-produit pour résoudre tous les problèmes de dimensions inférieures au dit "Triangle de Gagny". Or, ce n'est pas le cas pour les deux autres méthodes (IBM et CSEE surtout) qui sont plus spécialisées.

## *8.14 - Validité de l'heuristique "Mémoire Active"*

Nous avons montré au § 5.322 que l'heuristique se situait au niveau de la recombinaison correcte des actions à la sortie du C.V.C.Cette difficulté est inhérente aux hypothèses simplificatrices du chapitre II qui conduisent à décomposer l'espace en sous-espaces bidimensionnels et à ne pas prendre en compte des sous-espaces à 3, 4, etc., dimensions en vue de réduire le matériel et le temps de calcul.

On peut supposer que le point fondamental de savoir si on peut reconstruire exactement un espace n bidimensionnel à partir d'analyses dans des plans de projection, n'est pas étayé par des travaux mathématiques de très haut niveau. Nous avons montré que l'obtention d'une "reconstruction" exacte de l'espace passait par la détermination d'un "critère parfait de lever d'ambiguité". Or, jusqu'à présent, les mathématiques nous ont peu aidé dans ce domaine précis. Il faut se rappeler qu'il ne s'agit pas de la mise en forme d'une réalité physique telle que la loi de chute des corps, mais d'une tentative de simulation d'un phénomène mal connu : l'élaboration de l'acte intelligent. Or, on sait seulement qu'il n'est pas déterminé, même si on emploie des mathématiques pour le décrire.

Nous avons pu remarquer qu'il existait un grand nombre possible de "critères de lever d'ambiguité", ce qui forme un arbre gigantesque dont l'une des ramifications est susceptible de conduire à l'idéal : "le critère parfait de lever d'ambiguité".

Dans cette situation, il serait très satisfaisant pour l'esprit de pouvoir démontrer l'existence ou la non-existence d'un tel critère.Trois attitudes sont alors possibles :

- 1ère attitude :

Bien qu'un groupe de personnes n'arrive pas à démontrer une propriété avec l'arsenal des mathématiques connues, il n'est pas prouvé qu'un autre groupe avec les mêmes moyens, n'y parviendra pas.

- 2ème attitude :

La démonstration d'une certaine propriété peut ne pas appartenir au domaine d'une certaine mathématique. Rien n'empêche que cette démonstration soit possible avec une autre mathématique qui puisse la prendre en compte. Dans le cas présent, cela signifie que la mathématique connue est impuissante et qu'il faudrait peut-être créer une autre mathématique adaptée à ce genre de démonstration.

- 3ème attitude :

Devant l'échec des deux premières attitudes, il faudrait admettre le théorème de Gödel : "Il existe des propriétés indécidables, c'est-à-dire qu'il n'existe pas de démonstration, ni de réfutation (démonstration de leur négation)". Cela signifierait qu'il ne faudrait pas s'obstiner éternellement dans la recherche du "critère parfait de lever d'ambiguité" puisqu'il peut ne pas exister.

## *8.15 - Vers l'intégration dans un système cybernétique opérationnel*

Etant donné les résultats encourageants déjà obtenus avec le combinateur, il est logique d'envisager une méthodologie permettant de généraliser ses propriétés, de définir une machine opérationnelle et de prévoir son intégration dans des systèmes cybernétiques réels. Ce programme d'étude est illustré par l'organigramme 81 a. Il reste, certes, beaucoup de travaux à réaliser, mais il est possible d'ores et déjà d'envisager des applications en temps réel même s'il s'avérait impossible d'améliorer le pouvoir optimisant actuel de 0,95. Le problème fondamental maintenant est de savoir si cette valeur est conservée en traitant des problèmes variés de configuration différente. C'est le premier objectif à atteindre que nous avons matérialisé par le rectangle "Généralisation des propriétés".

Le deuxième objectif "Définition d'une machine opérationnelle", sera conditionné par les modifications de structures, par les études d'applications à des problèmes réels mais surtout par la simulation fonctionnelle sur ordinateur qui devrait permettre la séparation des fonctions à réaliser en "hardware" de celles qui pourront être prises en compte par le "software".

Le troisième objectif "Systèmes cybernétiques opérationnels" résultera vraisemblement d'un compromis entre la "machine opérationnelle" précédemment définie, considérée comme "centre de décision", un ordinateur préparant les données et gérant les résultats et des systèmes de télécommunications collectant des informations (systèmes afférents) et transmettant des ordres sur le terrain (systèmes afférents).

Si un jour cette intégration se réalise, le combinateur expérimental aura rempli sa mission dans le domaine des applications ferroviaires certes, mais aussi dans le domaine plus vaste des "Mémoires Actives", car il aura permis de faire le point sur plusieurs aspects de ces structures, tout en permettant de réaliser des progrès considérables dans l'élaboration de nouvelles machines. A ce titre, je considère qu'il aura été un précieux tremplin pour orienter les choix futurs en matière d'informatique de l'ordonnancement.

## 8.2 - Les STRUCTURES "MEMOIRES ACTIVES" : COMBINATEURS OPTIMISANTS de l'AVENIR

### 8.21 - Une nouvelle classe de machines à comportement intelligent

Comme on a pu le constater, le domaine de la "Mémoire Active" n'est pas du tout celui d'une calculatrice mais celui d'un système qui bénéficie de son expérience passée et qui peut trouver des solutions non prévues par ses concepteurs avec bien sûr tous les avantages et les risques que cela comporte.

En effet, devant certains problèmes hautement combinatoires, ces structures simulent en quelque sorte le processus d'apprentissage pratique à l'aide d'une fonction de généralisation des cas particuliers.Cela s'obtient naturellement au prix d'un certain risque d'erreur, mais ces erreurs mêmes peuvent être génératrices de possibilités nouvelles. D'ailleurs cette machine est le produit de chercheurs qui appartiennent à la famille des "simulateurs de l'intelligence". Comme on l'a déjà vu, cette école a pour ambition de créer des mécanismes qui imitent notre comportement, y compris ses défauts. Il n'y a donc pas lieu de s'étonner des imperfections de certaines solutions données par la machine elle-même.

Rappelons que sa caractéristique fondamentale réside dans sa capacité à faire des choix, faculté qui s'accorde parfaitement avec l'origine du mot latin "intelligere" qui signifie "choisir entre". C'est en cela surtout qu'elle relève du domaine de l'intelligence artificielle. Aussi, cette nouvelle structure capable dans certaines circonstances de faire preuve d'un comportement intelligent, n'entre pas en compétition avec les ordinateurs. Elle pourra les remplacer pour certains types de problèmes et les compléter dans d'autres.

### 8.22 - Aspect philosophique

Selon le Docteur SAUVAN, la "Mémoire Active" n'étant qu'un simulateur d'intelligence, elle ne permet pas de tirer des conclusions quant au fonctionnement du cerveau humain, tout au plus elle peut élargir notre champ de connaissance dans ce domaine. De plus, l'originalité des performances laisse tout de même une incertitude sur l'essentiel. Quel que soit l'intérêt que présentent certaines fonctions, la question se pose de savoir qui les met en oeuvre, qui les choisit, comment sont définies les fonctions de départ et d'arrivée, le but ? A l'origine, on retrouve évidemment l'intelligence humaine. Il serait donc prétentieux de parler d'intelligence des machines, tout au plus ces dernières sont-elles capables de simuler un comportement intelligent.

Cependant, par leur mécanisation, elles seront capables de décupler les possibilités intellectuelles de l'homme comme le levier d'Archimède a décuplé sa force. En cela, elles représentent un "véritable amplificateur d'intelligence". De telles structures obligeront l'homme à réfléchir et à mieux réfléchir. Elles n'étoufferont pas son intuition mais au contraire en multiplieront les effets.

"Nous vivons au siècle de l'intelligence, écrit le Docteur SAUVAN, mais personne ne sait si l'évolution ne continuera pas et si les diverses manifestations permettant les combinaisons d'informations les plus utiles ne seront pas un jour le fait de mécanismes mieux adaptés. La dignité de l'homme sera alors d'être un être affectif, mais affectif d'une manière dont nous n'avons actuellement aucune idée".

*8.23 - Plaidoyer pour les "machines à penser"*

Pour esquisser à long terme le développement de telles machines, nous emprunterons un propos de Jacques PITRAT :

"Les écrivains d'anticipation qui, vers 1905, traitaient de la société 50 ans plus tard, voyaient l'aviation très répandue. Les ménagères prenaient leur avion pour aller au marché et décollaient du toit de la maison transformé en aérodrome. Par contre, les vitesses de ces avions étaient relativement inadaptées, les plus audacieux prévoyaient 200 km/h mais cela naturellement, personne ne le croyait. Les avions sont moins répandus qu'ils ne l'avaient prévu, mais ils ont des performances qui dépassent de loin celles que l'on prédisait. Il en sera sans doute de même pour les "machines qui pensent".

Si on ne doit jamais voir "le robot" intelligent jouant au logis le rôle de la bonne à tout faire, il y aura au moins quelques machines travaillant en temps réel qui, dans leur programme, auront des fonctions relevant de l'intelligence et qui commanderont des centrales nucléaires ou des systèmes militaires de protection. Il y aura quelques laboratoires où fonctionneront des programmes produisant des théorèmes, mais les résultats sortis des machines auront un intérêt et une originalité qui dépassent de loin tout ce que l'on peut prévoir actuellement".

Je crois que les "Mémoires Actives" s'inscrivent dans cette génération et que de ce fait, il est difficile à l'heure actuelle d'entrevoir les bouleversements qu'elles apporteront. Cependant, pour avoir une idée sur leur développement possible, il est légitime d'adopter une attitude prospective basée sur des données économiques.

Rappelons que le chiffre d'affaires mondial de l'informatique consacré aux problèmes d'ordonnancement est actuellement de 50 milliards de francs, qu'il passera à 500 milliards d'ici dix ans, et qu'à cette cadence on peut affirmer que dans trente ans le marché des ordinateurs que nous connaissons actuellement ne représentera que 10 % du marché total de l'informatique. Ces chiffres montrent le développement prodigieux qui attendent certaines innovations faites ou à faire.

En ce qui concerne les "Mémoires Actives", leur développement est étroitement lié au choix que la Société fera. Il faut savoir que sur 300 000 brevets déposés par an, seuls 4 000 se réalisent. Actuellement, le problème est de savoir si les "Mémoires Actives" appartiendront ou non au cercle privilégié des "élus".

Dans cette deuxième moitié du vingtième siècle, l'information a plus d'importance que la production d'énergie. Pour diriger avec perspicacité, il faut pouvoir connaître les conséquences des actions à engager. Or, les problèmes à traiter ont généralement un caractère combinatoire, voire hautement combinatoire où se superposent des centaines de variables ou davantage : l'ordinateur est à la limite de ses possibilités de traitement. Aussi, une nouvelle génération de calculateurs électroniques, probablement des "combinateurs" sera-t-elle nécessaire. Ces machines aux accès simultanés par milliers (comme nos sens) devraient fatalement remplacer les machines à traitement séquentiel dans le domaine de l'ordonnancement.

Les "Mémoires Actives", inspirées du fonctionnement de l'intelligence humaine, répondraient à ce besoin nouveau. Encore faut-il que la Société accorde sa confiance à cette génération nouvelle des "Combinateurs Optimisants" !

# INDEX des SIGLES et ABREVIATIONS

| | | |
|---|---|---|
| A.L.X. | Alignement X | 4.711232 |
| C.A.A. | Centre d'Association d'Actions | 2.342 |
| C.A.S. | Centre d'Association de situations | 2.342 |
| CC. | Compteur contraintes | 4.7124 |
| C.F.F. | Clocked Flip - Flop | 4.7132 |
| CHI. | Chemin inférieur | 4.533 |
| CHS. | Chemin supérieur | 4.533 |
| Cg | Conflit de convergence | 4.32 |
| C.I. | Centre d'Inscription | 2.3411 |
| CPL. | Compteur de Progression libre | 4.7124 |
| CPS. | Compteur de Progression subordonné | 4.7124 |
| CS. | Conflit de cisaillement | 4.32 |
| C.V.A. | Centre de Validation d'Actions | 4.541 |
| Dg | Conflit de divergence | 4.32 |
| D.T.L. | Digital Transistor Logic | 4.38 |
| DYNA. | Dynamique | 4.5425 |
| E.C.X. | Extrémité de côté X | 4.711232 |
| E.H.C. | Ensemble hybride central | 7.3414 |
| EX. | Esclave X | 4.711232 |
| EY. | Esclave Y | 4.711232 |
| F.R.P. | Fluidification réévaluable périodiquement | 7.23 |
| H | Horloge | |
| H1 | Hypothèse de décomposition | Définition des neuf Hypothèses 1.443 |
| H2 | - parallélisme | |
| H3 | - recombinaison | |
| H4 | - d'adaptation | |
| H5 | - d'apprentissage | |
| H6 | - d'imagination | |
| H7 | - d'abstraction | |
| H8 | - de généralisation | |
| H9 | - de recherche au hasard | |
| HIA. | Hiérarchie interactions | 4.5422 |
| HIV. | Hiérarchie intervariables | 4.5423 |
| HLP. | Circulation d'une locomotive seule (haut le pied) | |
| m | Espérance mathématique du modèle des solutions MA. | 5.334 |
| M2 | Mémoire Active du Laboratoire de Cybernétique de la SNECMA | 2.22 |
| M.A. | Mémoire Active S.N.C.F. | |
| MAE. | Machine à écrire électrique | 4.91 |
| MX. | Maître X | 4.7112 |
| MY. | Maître Y | 4.7112 |
| Nβ | Nombre de pas β | 4.543 |
| Nm | Module de la solution minimum donnée par la M.A. | 5.334 |
| No | Module de la solution optimum | 5.334 |
| O | Ordinateur | |
| $\mathcal{P}$O | Pouvoir optimisant | 5.334 |
| PRIO. | Priorité | 4.5424 |
| RA. | Train marchandises du régime accéléré | |
| RAZ. | Remise à zéro logique | |
| RO. | Train marchandises du régime ordinaire | |
| S. | Situation | 2.32 |
| S.A.R.F. | Système autoadaptatif de reconnaissance des formes | 1.433 |
| SA. | Situation d'arrivée | 2.32 |
| SD. | Situation de départ | 2.32 |
| Si. | Système d'actions présenté à l'entrée du CVC | 4.544 |
| S'i | Système d'actions résultant en sortie du CVC | 4.544 |
| STAT. | Statique | |
| Ss. | Conflit de succession | 4.32 |
| T. | Opérateur translation | 1.4144 |
| U.O. | Unité optimisante | 7.3414 |
| U.T. | Unité de traitement | 7.3414 |
| α | Exploration C.A.S. de SD vers SA | 4.538 |
| β | Exploration C.A.S. rétrograde de SA vers SD | 4.538 |
| γ | Vecteur élémentaire résultant ou "pas" définissant une fraction de la stratégie | 4.538 |
| μ | Espérance mathématique théorique du module des solutions | 5.334 |

Académie de Paris

UNIVERSITE de PARIS VI
11, Quai Saint Bernard - Paris 5

SERVICE DE LA SCOLARITE
Bureau des Enseignements du 3e Cycle

tél. 336.25.25 et 325.12.21

# PERMIS D'IMPRIMER

DOCTORAT : . . . . .

THESE DE : . . . DOCTEUR - INGENIEUR . . . . . .

NOM : . . . GENETE . . . . . .

Prénoms : . . Maurice . . . . . .

né le 16 Août . . . 1942 . à . . . Trezelles . . . . . Dépt : . . Allier

1ère THESE : . . Contribution à l'étude ,à la réalisation et à l'exploitation d'un prototype expérimental de combinateur électronique optimisant adapté à l'ordonnancement et à la fluidification du trafic ferroviaire,basé sur le principe dit "MEMOIRE ACTIVE." . . . . . .

. . . . . .

2e THESE (Propositions faites par l'Université) : . . . . . .

. . . . . .

. . . . . .

. . . . . .

ACADÉMIE DE PARIS
UNIVERSITÉ
PARIS VI

Vu et Approuvé

PARIS, le . . . 16. Juillet. 1971

Le Président

de l'Université de PARIS VI